

Sveučilište u Zagrebu  
**Fakultet strojarstva i brodogradnje**

# **DIPLOMSKI RAD**

Voditelj rada:  
Prof.dr.sc. Đurđica Španiček

Davor Mandić

Zagreb, 2009

Sveučilište u Zagrebu  
**Fakultet strojarstva i brodogradnje**

# **DIPLOMSKI RAD**

Davor Mandić

Zagreb, 2009



## **Sažetak rada**

Zbog svojih dobrih mehaničkih i fizikalnih svojstava kompoziti imaju vrlo raširenu primjenu. Kako konačna svojstva ovise o velikom broju utjecaja, u radu je ispitivan utjecaj uvjeta pripreme kompozita. U tu svrhu pripremljen je polimerni kompozit na osnovi poliesterske smole ojačan staklenim vlaknima otvrdnjava se pri različitim uvjetima. Utjecaj tih uvjeta određen je ispitivanjem udarne žilavosti, međuslojne čvrstoće, tvrdoće i udjelom šupljina.

## Sadržaj:

1. UVOD .....	12
2. SVOJSTVA KOMPOZITNIH MATERIJALA NA OSNOVI ORGANSKIH MATRICA .....	14
2.1 Nezasićene poliesterske smole .....	16
2.1.1 Mehanička svojstva nezasićene poliesterske smole .....	17
2.1.2 Postojanost pri povišenim temperaturama .....	18
2.1.3 Kemijska postojanost .....	19
2.1.4 Postojanost na ultraljubičasto zračenje .....	20
3. SVOJSTVA KOMPOZITNIH MATERIJALA OJAČANIH VLAKNIMA.....	21
3.1 Staklena vlakna .....	25
3.1.1 E-staklena vlakna .....	26
3.1.2 Specijalna staklena vlakna .....	26
3.1.3 Proizvodnja staklenih vlakana .....	27
4. OJAČALA U OBLIKU TKANINA.....	29
4.1 Jednosmjerna i dvosmjerna pletiva .....	29
5. MEĐUPOVRŠINE I MEĐUSLOJEVI.....	32
5.1 Sposobnost kvašenja .....	34
5.2 Značaj adhezije vlakno-matrica .....	36
5.3 Utjecaj međusloja na adheziju .....	37
5.4 Utjecaj šupljina na kvalitetu međusloja .....	38
5.5 Oblici oštećivanja polimernih kompozita .....	39
6. EKSPERIMENTALNI DIO.....	41
6.1 Određivanje udarne žilavosti.....	41
6.1.1 Rezultati ispitivanja udarne žilavosti .....	46
6.2 Određivanje prividne međuslojne smične čvrstoće metodom kratke grede.....	52
6.2.1 Rezultati ispitivanja prividne međuslojne smične čvrstoće .....	55
6.3 Određivanje tvrdoće .....	57
6.3.1 Rezultati ispitivanja tvrdoće.....	58
6.4 Određivanje sadržaja šupljina .....	61
6.5 Korelacijska i regresijska analiza rezultata .....	62
6.5.1 Korelacijska i regresijska analiza rezultata za kompozit umreživan pri sobnoj temperaturi.....	62
6.5.2 Korelacijska i regresijska analiza rezultata za kompozit umreživan u termostatu .....	67
7. ZAKLJUČAK .....	71
8. LITERATURA.....	73

## Popis slika

*Slika 1. Toplinska postojanost poliesterske smole ojačane staklenim vlaknima [2]*

*Slika 2. Različiti načini rasporeda vlaknastih ojačavala. a)kontinuirana jednosmjerna vlakna, b)slučajno usmjerena diskontinuirana vlakna, c)ortogonalno raspoređena vlakna, d)višesmjerno raspoređena vlakna [1]*

*Slika 3. Dijagram naprezanje-istezanje vlaknima ojačanog kompozita [1]*

*Slika 4. Specifični modul elastičnosti i specifična čvrstoća nekih vlakana za ojačavanje [2]*

*Slika 5. Staklena vlakna [4]*

*Slika 6. Peć za taljenje stakla [2]*

*Slika 7. Proces proizvodnje staklenih vlakana [2]*

*Slika 8. Ortogonalno postavljena vlakna [2]*

*Slika 9. Platno vez [4]*

*Slika 10. Panama vez [4]*

*Slika 11. Saten tkanje [4]*

*Slika 12. Jednosmjerna tkanja [4]*

*Slika 13. Sukljani vez [2]*

*Slika 14. Shematski prikaz međusloja vlakno-matrica [2]*

*Slika 15. Shematski prikaz kontaktnog kuta i površinskih napetosti [2]*

*Slika 16. Shematski prikaz šupljina u polimernom kompozitu*

*Slika 17. Shematski prikaz loma laminata unutar sloja*

*Slika 18. Shematski prikaz loma laminata između slojeva (raslojavanje)*

*Slika 19. Shematski prikaz loma matrice polimernog kompozita*

*Slika 20. Charpy-ev bat*

*Slika 21. Epruveta*

*Slika 22. Epruveta sa jednim zarezom*

*Slika 23. Normirani oblik zareza*

*Slika 24. Promjena udarne žilavosti za epruvete bez zareza nakon godine dana*

*Slika 25. Smanjenje udarne žilavosti kod epruveta sa zarezom  
ispitivanih nakon godinu dana*

*Slika 26. Univerzalna kidalica*

*Slika 27. Oblik ispitka i način djelovanja opterećenja*

*Slika 28. Postavljanje epruvete u napravu za stezanje*

*Slika 29. Dijagram rezultata srednjih vrijednosti međuslojne čvrstoće*

*Slika 30. a) Tvrdomjer Zwick 3106, b) Položaj ispitka i način utiskivanja kuglice*

*Slika 31. Prikaz rezultata tvrdoće za kompozit umreživan pri sobnoj temperaturi*

*Slika 32. Prikaz rezultata tvrdoće za kompozit umreživan u termostatu pri 60°C*

*Slika 33. Usporedba vrijednosti tvrdoća za oba kompozita*

*Slika 34. Mikroskopske slike izbruska dobivenog iz kompozita koji je umreživan pri sobnoj temperaturi (povećanje x 100)*

*Slika 35. Mikroskopske slike izbruska dobivenog iz kompozita koji je umreživan u termostatu pri 60°C (povećanje x 100)*

*Slika 36. Djelovanje tvrdoće na udarnu žilavost kompozita umreživanog pri sobnoj temperaturi*

*Slika 37. Djelovanje udjela šupljina na međuslojnu čvrstoću kompozita umreživanog pri sobnoj temperaturi*

*Slika 38. Djelovanje tvrdoće na udarnu žilavost kompozita umreživanog u termostatu*

*Slika 39. Djelovanje udjela šupljina na međuslojnu čvrstoću kompozita umreživanog u termostatu*

## Popis tablica

*Tablica 1. Mehanička svojstva nekih polimernih kompozita [3]*

*Tablica 2. Mehanička svojstva neojačane poliesterske smole [2]*

*Tablica 3. Mehanička svojstva poliesterske smole ojačane staklenim vlaknima [2]*

*Tablica 4. Kemijska postojanost poliesterske smole ojačane staklenim vlaknima [2]*

*Tablica 5. Mehanička svojstva vlakana za ojačavanje polimernih kompozita [2]*

*Tablica 6. Srednje vrijednosti udarne žilavosti epruveta ispitanih prije godinu dana*

*Tablica 7. Rezultati udarne žilavosti za epruvete bez zareza umreživane pri sobnoj temperaturi*

*Tablica 8. Rezultati udarne žilavosti za epruvete bez zareza umreživane u termostatu pri 60°C*

*Tablica 9. Rezultati udarne žilavosti za epruvete sa zarezom umreživane pri sobnoj temperaturi*

*Tablica 10. Rezultati udarne žilavosti za epruvete sa zarezom umreživane pri 60°C*

*Tablica 11. Srednje vrijednosti udarne žilavosti*

*Tablica 12. Normirane dimenzije ispitaka*

*Tablica 13. Rezultati međuslojne čvrstoće za epruvete umreživane pri sobnoj temperaturi*

*Tablica 14. Rezultati međuslojne čvrstoće za epruvete umreživane u termostatu pri 60°C*

*Tablica 15. Rezultati srednjih vrijednosti tvrdoća za kompozit umreživan pri sobnoj temperaturi*

*Tablica 16. Rezultati srednjih vrijednosti tvrdoća za kompozit umreživan u termostatu pri 60°C*

*Tablica 17: Matrica koeficijenata korelacije za kompozit umreživan pri sobnoj temperaturi*

*Tablica 18: Rezultati regresijske analize za kompozit umreživan pri sobnoj temperaturi*

*Tablica 19: Analiza varijance za regresiju (kompozit umreživan pri sobnoj temperaturi)*

*Tablica 20: Matrica koeficijenata korelacije za kompozit umreživan pri sobnoj temperaturi.  
Međuslojna čvrstoća u zavisnosti od tvrdoće i udjela šupljina*

*Tablica 21: Rezultati regresijske analize za kompozit umreživan pri sobnoj temperaturi.  
Međuslojna čvrstoća u zavisnosti od tvrdoće i udjela šupljina*

*Tablica 22: Analiza varijance za regresiju (kompozit umreživan pri sobnoj temperaturi).  
Međuslojna čvrstoća u zavisnosti od tvrdoće i udjela šupljina*

*Tablica 23. Matrica koeficijenata korelacije za kompozit umreživan u termostatu*



*Tablica 24: Rezultati regresijske analize za kompozit umreživan u termostat*

*Tablica 25: Analiza varijance za regresiju (kompozit umreživan u termostatu)*

*Tablica 26: Matrica koeficijenata korelacije za kompozit umreživan u termostatu. Međuslojna čvrstoća u zavisnosti od tvrdoće i udjela šupljina*

*Tablica 27: Rezultati regresijske analize za kompozit umreživan u termostatu. Međuslojna čvrstoća u zavisnosti od tvrdoće i udjela šupljina*

*Tablica 28: Analiza varijance za regresiju (kompozit umreživan u termostatu). Međuslojna čvrstoća u zavisnosti od tvrdoće i udjela šupljina*

## Popis oznaka i mjernih jedinica fizikalnih veličina

$A$ , % - istezljivost

$\alpha$ ,  $K^{-1}$  - toplinska rastezljivost

$a_{cU}$ ,  $J/mm^2$  - udarna žilavost na nezarezanim epruvetama

$a_{cN}$ ,  $J/mm^2$  - udarna žilavost na zarezanim epruvetama

$b$ , mm - širina

$d$ , mm - promjer

$E$ ,  $N/mm^2$  - modul elastičnosti

$E_c$ , J - utrošena energija

$E_v$ ,  $N/mm^2$  - rastezni modul elastičnosti

$F_{max}$ , N - opterećenje pri lomu

$G$ , S - električna vodljivost

$h$ , mm - debljina

$L$ , mm - razmak između oslonaca

$l$ , mm - dužina

$r$ , mm - radijus

$R_e$ ,  $N/mm^2$  - granica razvlačenja

$R_{ms}$ ,  $N/mm^2$  - savojna čvrstoća

$R_m$ ,  $N/mm^2$  - rastezna čvrstoća

$R_{mt}$ ,  $N/mm^2$  - tlačna čvrstoća

$T_t$ , K - talište materijala

$\tau$ ,  $N/mm^2$  - međuslojna čvrstoća

$\rho$ ,  $kg/m^3$  - gustoća

$\lambda$ , W/mK - toplinska vodljivost

## **Izjava**

Izjavljujem da sam diplomski rad s naslovom UTJECAJ UVJETA PRIPRAVE KOMPOZITA NA SVOJSTVA izradio samostalno pod voditeljstvom prof. dr. sc. Đurđice Španiček, a pri izradi diplomskog rada stručnu pomoć pružili su mi laboranti Vesna Torjanac i Božidar Bušetinčan kojima se ovim putem zahvaljujem.

Davor Mandić

## 1. UVOD

Kompozitni materijali dobiveni su umjetnim spajanjem dvaju ili više materijala različitih svojstava s ciljem dobivanja materijala takvih svojstava kakva ne posjeduje niti jedna komponenta sama za sebe [1]. Razvojem kompozita mogu se postići neuobičajne kombinacije svojstava, kao što su krutost, čvrstoća, masa, ponašanje pri povišenim temperaturama, kemijska postojanost, tvrdoća. Moderni kompozitni materijali prilagođeni su da postignu odgovarajuću ravnotežu svojstava za široki raspon primjena. Kompozitni materijali imaju svojstva koja su superiornija od svojstava bilo koje zasebne komponente. Poboljšana strukturna svojstva su rezultat raspodjele opterećenja duž materijala. Velika prednost kompozitnih materijala je fleksibilnost prilikom dizajniranja kompozita.

Tipični kompozitni materijali ojačavaju se vlaknima ili česticama zbog čega je materijal krući i čvršći od kontinuirane matrice. Također mnoge vrste ojačala imaju dobru toplinsku i električnu vodljivost, koeficijent toplinskog rastezanja im je manji nego kod matrice i imaju dobru otpornost na trošenje.

Osnovna podjela kompozita prema vrsti matrice je na metalne, keramičke i polimerne kompozite. Metali, keramike i polimeri su matrice, kojoj se pridodaju razni dodaci u cilju modificiranja svojstava matrice. Osnovni tipovi kompozita obzirom na ojačala su kompoziti s česticama, vlaknima ojačani kompoziti i strukturni kompoziti.

Da bi se postigla zadovoljavajuća svojstva materijala, postotak ojačala mora biti veći od 10 %. Ojačalo se smatra česticom ako su mu sve dimenzije podjednake. Ojačanje viskerima i česticama svrstava se u diskontinuirana ojačanja.

Kontinuiranim vlaknima smatraju se vlakna čija je dužina mnogo veća od poprečnih dimenzija. Kompozit s diskontinuiranim vlaknima ili sa kratkim vlaknima mijenja svojstva ovisno o duljini vlakna. Kompoziti s kontinuiranim vlaknima sadrže vlakna koja su po duljini približno duga kao i kompozitni dio.

Svaki sloj kompozita s kontinuiranim vlaknima ima specifičnu orijentaciju vlakna. Slojevi se mogu povezati tako da svaki sloj ima specifičnu orijentaciju vlakana koja daju cijelom laminiranom materijalu dobra svojstva. Mnoge primjene zahtjevaju izotropnost svojstava, a to se postiže kontroliranom orijentacijom vlakana u laminatu.

Međutim, kod kompozita ojačanih tkaninom, vlakna su postavljena ortogonalno na strukturnu ravninu. Ovakav pristup koristi se iz više razloga, između ostalog, kako bi se dobila toplinska ili električna svojstva u trećoj dimenziji. Drugi razlog korištenja ove vrste vlakana je lakše rukovanje i manja cijena.

## 2. SVOJSTVA KOMPOZITNIH MATERIJALA NA OSNOVI ORGANSKIH MATRICA

Kompozitni materijali su konstrukcijski materijali koji su dizajnirani da omoguće visoku specifičnu čvrstoću ( $R_m(R_e)/\rho$ ) i specifični modul elastičnosti ( $E/\rho$ ). Kod kompozitnih materijala ojačala povisuju čvrstoću i krutost materijala. Vrijednosti čvrstoće i krutosti mogu se regulirati vrstom ojačala i količinom ojačala u materijalu. Kod vlaknima ojačanih kompozita čvrstoću i krutost može se, osim udjelom ojačala, varirati orijentacijom vlakana. Prednosti kompozitnih materijala u odnosu na druge materijale je visoka čvrstoća uz malu masu, mogućnost izrade složenih oblika, korozijska otpornost, dimenzijska stabilnost.

Svojstva kompozitnih materijala ovisit će o:

- svojstvima matrice i ojačala
- veličini i rasporedu konstituenata
- volumnom udjelu konstituenata
- tipu ojačala
- prirodi i jakosti veza između konstituenata

Svrha matrice je povezivanje ojačala pomoću adhezijskih i kohezijskih svojstava, raspoređivanje opterećenja na i između vlakana i zaštita ojačala od okoline i rukovanja. Matrica također omogućava kompaktnost kompozitu što olakšava rukovanje prilikom proizvodnje. Ovo je potrebno kod diskontinuiranih ojačala zato što ojačala nisu dovoljne dužine da omoguće kompaktnost radi lakšeg rukovanja. Zbog toga što su ojačala čvršća i kruća, matrica je često "slabija karika" u kompozitnom materijalu. Matrica kontrolira uzdužna svojstva, međuslojnu čvrstoću i povećava toplinsku izdržljivost kompozita. Međutim, matrica omogućava maksimalnu iskoristivost čvrstoće ojačala tako što ravnomjerno raspoređuje opterećenje.

Matrica drži vlakna u pravilnom položaju i orijentaciji tako da vlakna mogu izdržati nametnuto opterećenje i rasporediti ga ravnomjerno na druga vlakna.

Najčešće korištena vlakna su staklena, borna, aramidna i ugljična. Ojačanje staklenim vlaknima daje najvišu čvrstoću uz najmanju cijenu, dok na drugoj strani ojačanje ugljičnim vlaknima daje najvišu krutost ali uz najvišu cijenu.

Najviše vrijednosti čvrstoće posjeduju novi polimerni kompoziti ojačani ugljičnim vlaknima visokog modula elastičnosti. Polimerni kompoziti imaju znatno višu specifičnu čvrstoću i specifičnu krutost od svih ostalih materijala.

Osim tih prednosti pokazuju i visoku kemijsku otpornost na djelovanje niza agresivnih medija.

**Tablica 1:** Mehanička svojstva nekih polimernih kompozita [3]

<i>Vrsta kompozita</i>	<i>Udio vlakana, %</i>	<i>Rastezna čvrstoća <math>R_m</math>, N/mm<sup>2</sup></i>	<i>Rastezni modul elastičnosti <math>E_m</math>, kN/mm<sup>2</sup></i>	<i>Modul smičnosti <math>G</math>, kN/mm<sup>2</sup></i>	<i>Poissonov omjer, <math>\nu</math></i>
<i>Borna vlakna/epoksidna smola</i>	<b>50</b>	<b>1346</b>	<b>200</b>	<b>5,350</b>	<b>0,02...0,17</b>
<i>S-staklo/epoksidna smola</i>	<b>72</b>	<b>1282</b>	<b>60</b>	<b>11,931</b>	<b>0,09...0,23</b>
<i>Visokomodulna ugljična vlakna/epoksidna smola</i>	<b>45</b>	<b>837</b>	<b>189</b>	<b>6,171</b>	<b>0,10</b>
<i>Visokočvrsta ugljična vlakna/epoksidna smola</i>	<b>70</b>	<b>1495</b>	<b>144</b>	<b>6,857</b>	<b>0,01...0,28</b>
<i>Aramidna vlakna (Kevlar 49) /epoksidna smola</i>	<b>54</b>	<b>1180</b>	<b>84</b>	<b>2,811</b>	<b>0,02...0,32</b>

Za polimernu matricu najčešće se upotrebljavaju duromerne smole:

- Nezasićene poliesterske smole
- Epoksidne smole

Poliesterske i vinilesterske smole imaju najširu primjenu od svih ostalih materijala za matrice. Upotrebljavaju se u mnoge komercijalne i industrijske svrhe. Poliesterske smole najčešće se ojačavaju staklenim vlaknima zato što pružaju odlična mehanička svojstva i imaju prihvatljiv utjecaj na okoliš.

Epoksidne smole imaju najveću primjenu u novim kompozitima za primjenu u zrakoplovnoj industriji. Iako su epoksidne smole osjetljive na vlagu ipak imaju prednost pred poliesterskim smolama koje imaju slabiju otpornost na vlagu i slabija mehanička svojstva.

## 2.1 Nezasićene poliesterske smole

Polazna tvar za dobivanje nezasićenih poliesterskih smola su nezasićene organske kiseline i dioli, npr. etilen glikol [1]. Općenito poliesterske smole imaju široku industrijsku i komercijalnu upotrebu, a mogu se podijeliti u dvije glavne kategorije primjene: ojačane i neojačane. Ojačanjem poliesterske smole staklenim vlaknima dobivamo kompozit sa poboljšanim fizikalnim svojstvima. Tipične primjene ojačane poliesterske smole su trupovi manjih plovniha objekata, dijelovi automobila, krovovi kuća i korozijski postojani spremnici i cijevi. Cijena ojačane poliesterske smole je mala, a fizikalna svojstva se mogu prilagoditi po potrebi.

Poliesterske smole dijele se prema kemijskoj osnovi na:

- Izoftalne smole
- Ortoftalne smole
- Bisfenol A fumaratne smole
- Klorinirane smole
- Vinil esterske smole

**Izoftalne smole** su na osnovi izoftalne kiseline i maleinskih anhidrida. Dodavanje izoftalne kiseline stvara smolu visoke molekularne mase, dobre kemijske i toplinske otpornosti i dobrih mehaničkih svojstava. Dodavanje nepolarnih glikola uzrokuje poboljšanje otpornosti na tekućine što je potrebno kako bi se zaštitila staklena vlakna.

**Bisfenol A fumaratne smole** su dobivene reakcijom bisfenola i fumaratne kiseline. Rezultat je relativno nepolarni poliestar sa smanjenim brojem esterskih lanaca. Smanjeni broj esterskih lanaca doprinosi odličnom otpornošću na koroziju.

**Klorinirana smola** je dobivena reakcijom kloriniranog anhidrida s maleinskim anhidridom ili reakcijom klorinirane kiseline s maleinskim anhidridom. Kompoziti spravljeni od ove smole imaju odličnu kemijsku otpornost. Primjena ovih smola je u kiseloj ili oksidirajućoj okolini.

**Vinil esterske smole** su dobivene reakcijom monofunkcionalnih metakrilnih kiselina s epoksidnom smolom. Korozijska otpornost i mehanička svojstva vinil esterskih kompozita su puno bolja od prije navedenih smola.



### 2.1.1 Mehanička svojstva nezasićene poliesterske smole

Mehanička svojstva su često važan faktor pri odabiru poliesterske smole. Dok su fizikalna svojstva kompozita sa poliesterskom matricom pretežno kontrolirana pomoću ojačala, fizikalna svojstva poliesterske smole utječu na izdržljivost i toplinska svojstva. Poliesterske smole na osnovi izoftalne kiseline imaju višu rasteznu čvrstoću i produljenje od ortoftalnih smola. Smola na osnovi bisfenol A fumarata i klorinirana poliesterska smola na osnovi maleinske smole upotrebljavaju se u jakim korozivskim uvjetima i kruće su. Vinil esterske smole imaju odlična rastezna svojstva kao i visoko produljenje.

Ojačavanjem smole vlaknima poboljšavamo rastezna svojstva. Za ojačavanje poliesterske smole može se koristiti E – staklo, S – staklo, aramidna i ugljična vlakna.

U tablicama 2 i 3 prikazana su mehanička svojstva neojačane i ojačane poliesterske smole gdje je udio staklenih vlakana 40%.

**Tablica 2:** Mehanička svojstva neojačane poliesterske smole [2]

<i>Smola</i>	<i>Tvrdoća, Barcol</i>	<i>Rastezna čvrstoća, MPa</i>	<i>Modul elastičnosti, GPa</i>	<i>Produljenje, %</i>	<i>Tlačna čvrstoća, MPa</i>
<i>Ortoftalna</i>	...	55	3,45	2,1	...
<i>Izoftalna</i>	40	75	3,38	3,3	120
<i>Bisfenol A</i>	34	40	2,83	1,4	100
<i>Klorinirana</i>	40	20	3,38	...	100
<i>Vinil ester</i>	35	80	3,59	4,0	...

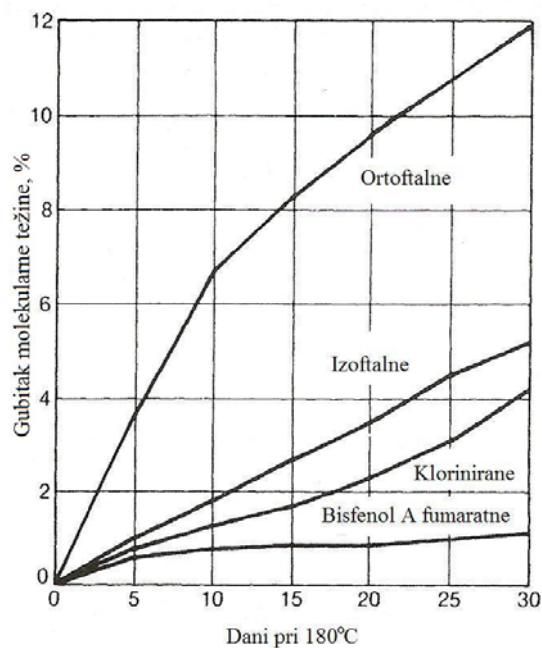
**Tablica 3:** Mehanička svojstva poliesterske smole ojačane staklenim vlaknima [2]

<b>Smola</b>	<b>Tvrdoća, Barcol</b>	<b>Rastezna čvrstoća, MPa</b>	<b>Module lastičnosti, GPa</b>	<b>Produljenje, %</b>	<b>Tlačna čvrstoća, MPa</b>
<i>Ortoftalna</i>	...	150	5,5	1,7	...
<i>Izofталna</i>	45	190	11,7	2,0	210
<i>Bisfenol A</i>	40	120	11,0	1,2	180
<i>Klorinirana</i>	40	140	9,7	1,4	120
<i>Vinil ester</i>	...	160	11,0	...	210

### 2.1.2 Postojanost pri povišenim temperaturama

Poliesterske smole često se koriste pri povišenim temperaturama, posebno u korozivnim uvjetima i na području elektrotehnike. Kod polimera pri temperaturama iznad 150°C dolazi do prekidanja kemijskih veza. Temperatura pri kojoj dolazi do rastvaranja ovisi o vrsti poliestera. Bez obzira na strukturu polimera, pri temperaturama blizu 300°C poliesterska smola će se spontano rastvoriti. Nezasićene poliesterske smole visoke molekularne težine pokazuju bolju postojanost pri temperaturama iznad 150°C nego smole niske molekularne težine. Izofталne i bisfenol A fumaratne smole visoke molekularne težine imaju odličnu postojanost pri povišenim temperaturama. Ortoftalne smole imaju slabu toplinsku postojanost zbog male molekularne težine zbog čega se primjenjuju pri niskim temperaturama.

Na slici 1 prikazan je gubitak molekularne težine poliesterskih smola pri držanju na povišenoj temperaturi.



Slika 1. Toplinska postojanost poliesterske smole ojačane staklenim vlaknima [2]

### 2.1.3 Kemijska postojanost

Poliesterske smole dugo se koriste u uvjetima gdje je potrebna otpornost na kemikalije. Odabir smole ovisi o specifičnim kemijskim uvjetima u kojima se koristi. Izofthalne smole koriste se u srednje vlažnim i srednje organskim uvjetima. Vinil esterske smole koriste se u agresivnijim uvjetima. Klorinirane smole koriste se u jakim kiselim i oksidirajućim uvjetima, posebno pri povišenim temperaturama. Bisfenol A fumaratne smole bolje su u kiselim uvjetima. Ojačavanjem poliesterske smole staklenim vlaknima ne povećava se otpornost na koroziju, a u nekim slučajevima ta otpornost opada, što ovisi o vrsti kiseline.

U tablici 4 prikazana je kemijska postojanost kompozita spravljenog od poliesterske smole ojačane staklenim vlaknima.

**Tablica 4:** *Kemijska postojanost poliesterske smole ojačane staklenim vlaknima [2]*

<i>Smola</i>	<i>75% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, pri 80°C</i>	<i>15% NaOH, pri 65°C</i>	<i>5,25% NaOCl, pri 65°C</i>	<i>Morska voda, pri 80°C</i>
<i>Izofталna</i>	-	-	-	-
<i>Klorinirana</i>	+	-	-	+
<i>Bisfenol A fumarat</i>	-	+	-	+
<i>Vinil ester</i>	-	-	+	+

#### 2.1.4 Postojanost na ultraljubičasto zračenje

Velika je uporaba poliesterskih smola u vanjskim uvjetima. Održavaju svojstva pri uporabi i do 30 godina, međutim dolazi do smanjenja čvrstoće i gubitka boje. Ultraljubičasto zračenje uzrokuje žutilo kompozita. Negativan utjecaj UV zračenja može se eliminirati dodavanjem UV stabilizatora na vanjski sloj kompozita. Također, smanjeno zračenje možemo ostvariti dodavanjem kemijskih aditiva koji absorbiraju UV zračenje.

### 3. SVOJSTVA KOMPOZITNIH MATERIJALA OJAČANIH VLAKNIMA

Osnovna svrha ojačala je omogućavanje odličnih mehaničkih svojstava čvrstoće i krutosti kompozita. Ojačala se dijele na :

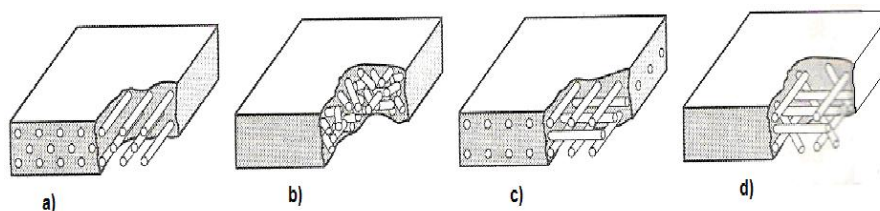
- vlakna
- čestice
- tkanja za strukturne kompozite (laminati i sendvič konstrukcije)

Najrašireniji tip ojačala, naročito za polimerne kompozite, su vlakna i dijele se na :

- vlakna
- viskere
- žice

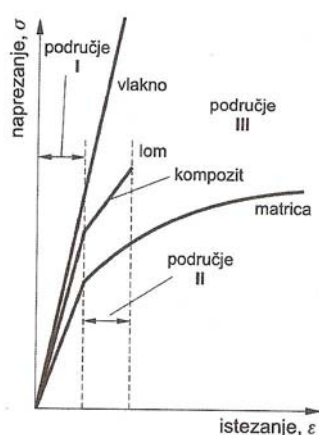
Vlakna mogu biti staklena, ugljična, aramidna i keramička. U uporabi su vrlo raznoliki materijali ojačala. Za ojačanje betonskih konstrukcija rabe se čelične šipke. Na osnovi staklenih vlakana ugrađenih u polimernu matricu dobiva se kompozit uporabiv za transportna sredstva te primjenu u zrakoplovstvu. Vlakna načinjena od bora, ugljika i polimera osiguravaju izrazito ojačavanje [1]. Za ojačanje se koriste i viskeri. Osim toga ojačala mogu biti raspoređena na različite načine (slika 2).

Od vlakana mogu se izraditi tkanine ili trake. Slojevi traka mogu se različito usmjeravati.



Slika 2. Različiti načini rasporeda vlaknastih ojačavala. a) kontinuirana jednosmjerna vlakna, b) slučajno usmjerena diskontinuirana vlakna, c) ortogonalno raspoređena vlakna, d) višesmjerno raspoređena vlakna [1]

Vlknasta ojačanja su ključna komponenta kod kompozita s polimernom matricom, metalnom matricom i keramičkom matricom. Vlakna povisuju čvrstoću i krutost matrici, a također mogu osigurati i druga svojstva kao što su otpornost pri visokim temperaturama i otpornost na puzanje. Kompozitnim materijalima mogu se postići željena svojstva za specifičnu konstrukciju uz razumnu cijenu iako je cijena vlakana visoka. Na slici 3 prikazan je dijagram naprezanje-istezanje vlaknima ojačanog kompozita. Dijagram prikazuje ponašanje kompozitnog materijala pri naprezanjima s obzirom na matricu i vlakno.

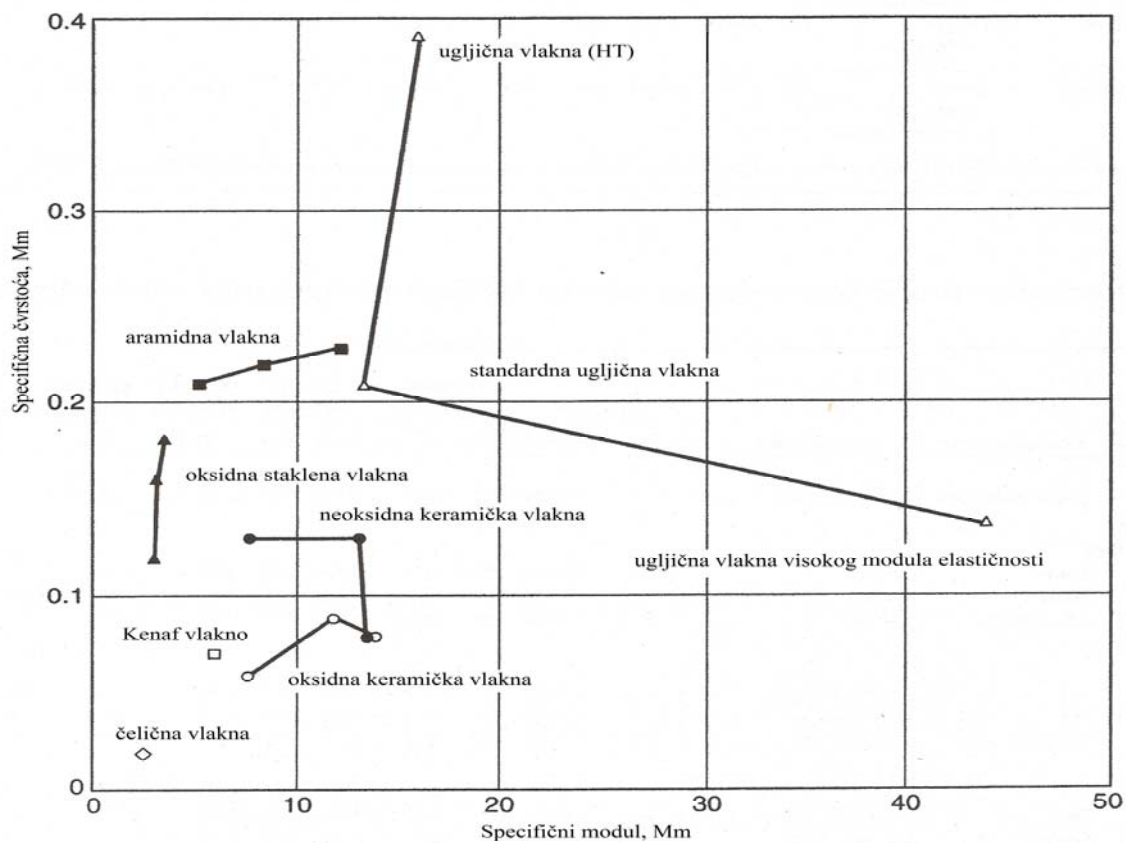


Slika 3. Dijagram naprezanje-istezanje vlaknima ojačanog kompozita [1]

Vlakna za ojačavanje dijele se prema kemijskom sastavu, strukturi i uporabi. Prirodna vlakna koja se dobivaju od biljaka koriste se za ojačanje polimernih matrica. Oksidna staklena vlakna su dobivena iz silikata ili kvarca. Ona su amorfnja i prvenstveno se koriste za ojačanje plastomera i duromera. Aramidna vlakna su aromatski poliamidi i koriste se za ojačavanje polimernih matrica, kao i ugljična vlakna. Keramička vlakna koriste se za ojačavanje keramičkih i metalnih matrica.

Kod polimernih kompozita glavna funkcija vlakana je povećanje čvrstoće i krutosti. Kod keramičkih kompozita primarna funkcija vlakana je olakšati rad pri visokim temperaturama, osigurati dobru lomnu žilavost i spriječiti rani krhki lom. Kod metalnih kompozita primarna funkcija vlakana je osigurati rad pri maksimalnim temperaturama da ne dođe do žilavog loma.

Na slici 4 prikazane su vrijednosti specifičnog modula elastičnosti i specifične čvrstoće vlakana za ojačavanje.



Slika 4. Specifični modul elastičnosti i specifična čvrstoća nekih vlakana za ojačavanje [2]

Nekim je polimernim kompozitnim materijalima potrebna visoka žilavost. Staklena vlakna imaju visoko produljenje prilikom loma dok ugljična vlakna koja su krhka imaju manje produljenje prilikom loma. Mjera za otpornost prema lomu kod keramičkih kompozita je lomna žilavost.

U tablici 5 prikazane su neke vrijednosti mehaničkih svojstava vlakana za ojačavanje polimernih kompozita.

**Tablica 5:** Mehanička svojstva vlakana za ojačavanje polimernih kompozita [2]

<i>Vlakno</i>	<i>Gustoća, g/cm<sup>3</sup></i>	<i>Modul elastičnosti, GPa</i>	<i>Rastezna čvrstoća, MPa</i>	<i>Specifični modul, Mm</i>	<i>Specifična čvrstoća, Mm</i>	<i>Produljenje pri lomu, %</i>	<i>Maksimalna temperatura uporabe, °C</i>
<i>E-staklo</i>	<i>2,54</i>	<i>76...79</i>	<i>3100...3800</i>	<i>3,1...3,2</i>	<i>0,124...0,153</i>	<i>4,8</i>	<i>500</i>
<i>S-staklo</i>	<i>2,48</i>	<i>88...91</i>	<i>4400</i>	<i>3,6...3,7</i>	<i>0,181</i>	<i>5,7</i>	<i>750</i>
<i>Aramidno vlakno, Twaron</i>	<i>1,45</i>	<i>17,6</i>	<i>3100</i>	<i>8,5</i>	<i>0,218</i>	<i>2</i>	<i>160</i>
<i>Aramidno vlakno, Kevlar 149</i>	<i>1,47</i>	<i>26,0</i>	<i>3500</i>	<i>12,4</i>	<i>0,243</i>	<i>2</i>	<i>160</i>

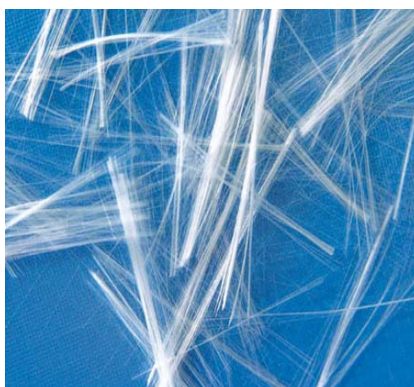
Vlakna mogu smanjiti prijenos vibracija zbog čega se mogu izrađivati kompozitni dijelovi koji omogućuju tiši rad.



### 3.1 Staklena vlakna

Staklena vlakna su najkorištenija ojačala današnjice (slika 5). Jednostavno se izrađuju iz sirovina koje su lako dostupne. Staklena vlakna koriste se kao ojačala za kompozite i za druge specijalne izradke. Vlakna imaju korisna početna svojstva kao što je tvrdoća, kemijska postojanost, prozirnost, čvrstoća, elastičnost i krutost.

Staklena vlakna se svrstavaju u dvije kategorije. Prva kategorija su staklena vlakna niske cijene i opće primjene, a druga kategorija su staklena vlakna za specijalne primjene. Više od 90 % staklenih vlakana je za opću primjenu i ta se stakla označavaju kao E-stakla. Ostale vrste staklenih vlakana koriste se za specijalne primjene.



*Slika 5. Staklena vlakna [4]*

Oznake staklenih vlakana :

- E – niska električna vodljivost
- S – visoka čvrstoća
- C – visoka kemijska postojanost
- M – visoka krutost
- A – alkalna stakla
- D – niska dielektrična konstanta

### 3.1.1 E-staklena vlakna

Postoje dvije vrste E-stakla, prva su stakla s borom (B), a druga bez bora. E-staklo sadrži od 5 % do 6 % borovog oksida. Zbog štetnog utjecaja borovog oksida na okolinu počela su se koristiti E-stakla koja ga ne sadrže.

Komercijalna bor E-stakla dolaze u dvije varijante. Prva varijanta ima kemijski sastav  $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-MgO}$ , a druga varijanta ima kemijski sastav  $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO}$ .

Temperatura oblikovanja E-stakla sa sadržajem bora iznosi od  $1140^\circ\text{C}$  do  $1185^\circ\text{C}$ . Temperatura taljenja iznosi od  $1050^\circ\text{C}$  do  $1064^\circ\text{C}$ , a temperatura omekšanja oko  $850^\circ\text{C}$ . Temperatura oblikovanja E-stakla bez sadržaja bora iznosi od  $1250^\circ\text{C}$  do  $1264^\circ\text{C}$ , a temperatura taljenja iznosi od  $1146^\circ\text{C}$  do  $1180^\circ\text{C}$ . Temperatura omekšanja iznosi oko  $916^\circ\text{C}$ . Modul elastičnosti kod E-stakla bez bora je oko 5% viši nego kod E-stakla sa borom dok je vlačna čvrstoća približno jednaka.

Kemijska postojanost E-stakla bez bora je sedam puta veća nego kod E-stakla sa borom. E-stakla bez bora imaju malo veću gustoću, koja iznosi  $2,62 \text{ g/cm}^3$ , od E-stakla sa borom, koja iznosi  $2,55 \text{ g/cm}^3$ . Također E-stakla bez bora imaju malo višu dielektričnu konstantu (7,0) od E-stakla sa borom koja iznosi od 5,9 do 6,6.

### 3.1.2 Specijalna staklena vlakna

Specijalna staklena vlakna uključuju staklena vlakna s visokom kemijskom otpornošću (ECR stakla), s visokom čvrstoćom (S, R, T stakla), sa slabom dielektričnom konstantom (D-stakla), vlakna visoke čvrstoće i silikatna ili kvarcna vlakna koja imaju visokotemperaturnu primjenu. Ostala specijalna staklena vlakna su A-stakla i C-stakla.

Kemijska postojanost staklenih vlakana ovisi o njihovoj kemijskoj strukturi. ECR staklena vlakna imaju visoku otpornost na kiseline. Dodaci ZnO i  $\text{TiO}_2$  E-staklu bez sadržaja bora dodatno poboljšavaju kemijsku postojanost ECR staklenih vlakana.

Staklena vlakana (S, R, T) imaju od 10% do 15% višu čvrstoću od E-staklenih vlakana. Također imaju višu temperaturu oblikovanja, više talište pa je potrebno uložiti više energije za njihovu izradu. Ova stakla se koriste u vojne svrhe.

D-staklo sadrži visoki udio  $\text{B}_2\text{O}_3$ , od 20% do 26%, i zbog toga imaju puno nižu dielektričnu konstantu od E-stakla. Zbog visoke cijene ove vrste stakla ono se manje koristi.

### 3.1.3 Proizvodnja staklenih vlakana

Staklo je amorfna krutina dobivena hlađenjem taljevine. Staklena taljevina dobiva se taljenjem silicija i minerala te se mora brzo hladiti kako bi se spriječila kristalizacija. Sadrži okside koji su potrebni da bi se dobili pravilni oblici.

Sva se kontinuirana vlakna izrađuju vučenjem, a zatim se taljevina oblikuje ekstrudiranjem kroz nekoliko tisuća rupica promjera od 0,793 mm do 3,175 mm. Dok su još visoko viskozna vlakna se brzo fino obrađuju vučenjem i zatim se skrutnjuju. Promjeri vlakana se kreću od 3  $\mu\text{m}$  do 20  $\mu\text{m}$ .

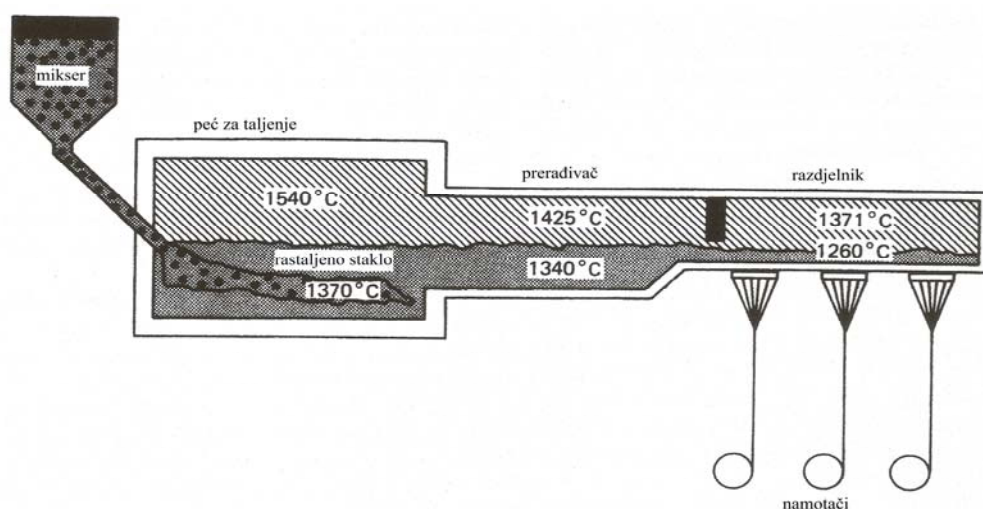
Drugi način proizvodnje staklenih vlakana je oblikovanje staklenih kuglica iz taljevine stakla. Promjer kuglica je od 2 cm do 3 cm. Kuglice se ponovno tale i iz taljevine oblikuju staklena vlakna. Ovim načinom proizvodnje dobivaju se vlakna visoke čvrstoće.

Proces formiranja staklenih vlakana sastoji se od sljedećih koraka:

- Miješanje i taljenje
- Sortiranje
- Završna obrada

Taljenje stakla započinje mjerenjem mase i miješanjem odabrane sirovine. Danas je proces u potpunosti automatiziran. Komponente se zasebno dovode do posude za miješanje prije nego što se transportiraju do peći za taljenje.

Peć za taljenje dijeli se na tri dijela (slika 6).

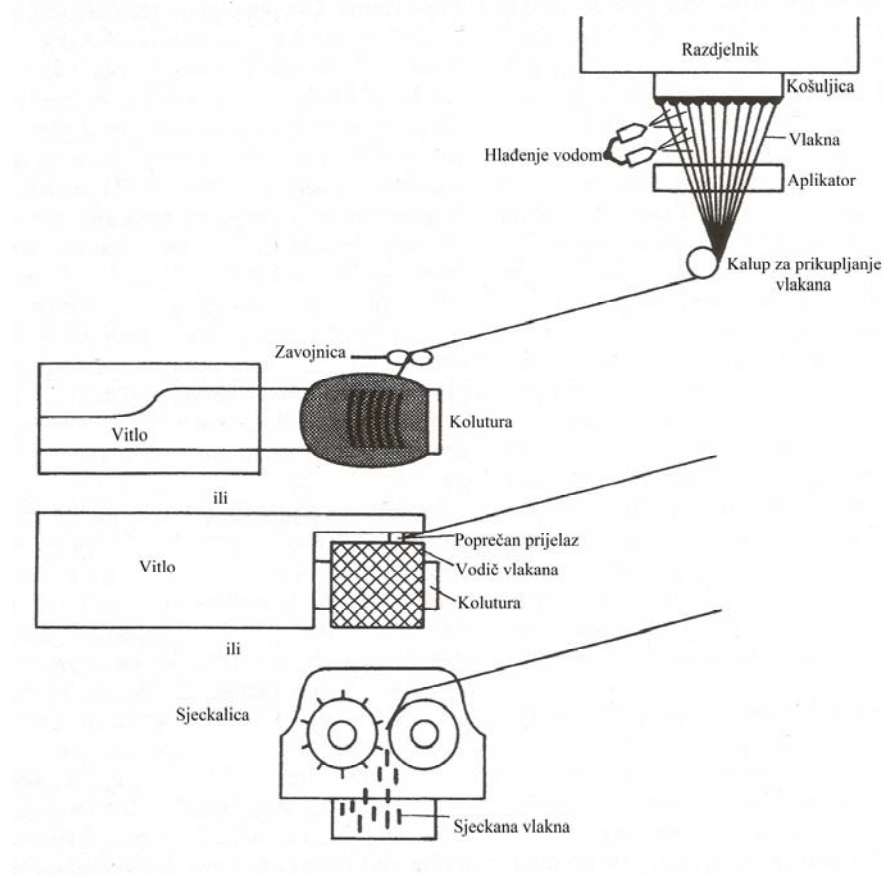


Slika 6. Peć za taljenje stakla [2]

Mješavina se prvo dovodi do dijela gdje nastupa taljenje, uklanjanje uključaka plina i homogenizacija. Zatim taljevina teče do dijela za prerađivanje gdje se temperatura stakla snizuje sa  $1370^{\circ}\text{C}$  na oko  $1260^{\circ}\text{C}$ . Rastaljeno staklo zatim ide do razdjelnika koji se nalazi iznad postrojenja za formiranje vlakana. Temperature kroz cijeli proces ovise o viskoznosti pojedinog stakla.

Pretvaranje rastaljenog stakla u kontinuirana vlakna je zapravo proces stanjivanja (slika 7). Rastaljeno staklo teče kroz košuljicu od legure platine i rodija koja se sastoji od 400 do 8000 rupica. Košuljica ima električne grijače za održavanje viskoznost staklene taljevine. Vlakna se povlače dolje i brzo hlade pri izlasku iz košuljice. Zatim slijedi sortiranje vlakana po veličini.

Dijelovi za sortiranje po veličini omogućuju napinjanje, kompatibilnost prema smolama, mazivost i adhezivnost vlakana, pri čemu se ostvaruju svojstva za posebne zahtjeve pri upotrebi. Na promjer vlakana utječe temperatura i tlak u košuljici i viskoznost stakla.



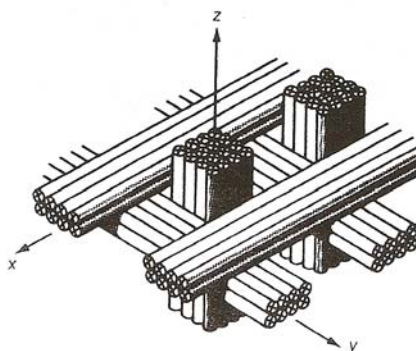
Slika 7. Proces proizvodnje staklenih vlakana [2]

## 4. OJAČALA U OBLIKU TKANINA

Prednost uporabe ojačala u obliku tkanina je lakše rukovanje, a mehanička svojstva ugljičnih i aramidnih pletiva nadmašuju vrijednosti svojstava koja odgovaraju aluminiju i čeliku u smislu omjera čvrstoće i mase. Različite vrijednosti svojstava su moguća pomoću kombiniranja različitih tkanja.

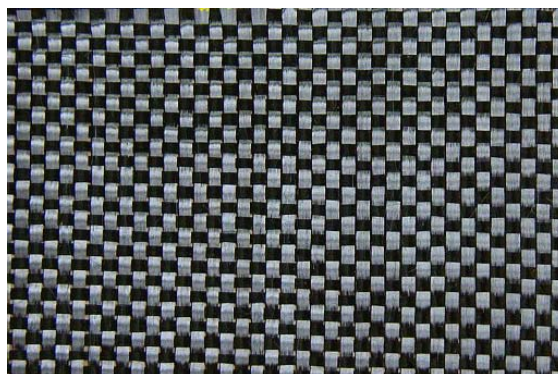
### 4.1 Jednosmjerna i dvosmjerna pletiva

Uzorak tkanine možemo prikazati u  $x$ ,  $y$ ,  $z$  koordinatnom sustavu (slika 8). Os  $y$  predstavlja savijeno vlakno, to je dužina pletiva koja se može kretati od 30 metara do 150 metara ili od 100 metara do 500 metara. Os  $x$  je poprečna dužina koja se može kretati od 910 mm do 3050 mm.



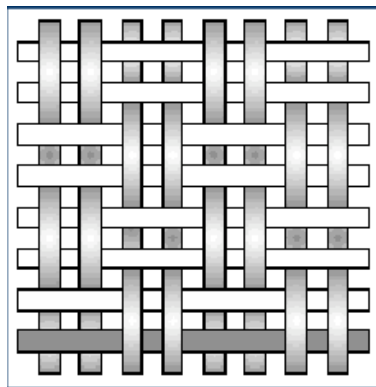
Slika 8. Ortogonalno postavljena vlakna [2]

Najčešća vrsta pletiva kod staklenim vlaknima ojačanog kompozita je platno vez. Platno je temeljni vez s najmanjom jedinicom veza koja je prikazana na slici 9.



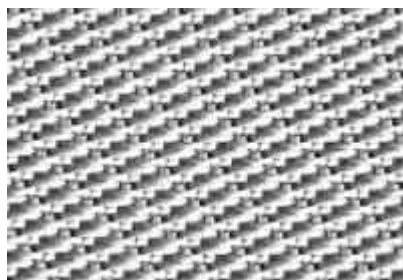
Slika 9. Platno vez [4]

Najjednostavnija konstrukcija sastoji se od četiri valovitih vlakana od koja su dva uzdužna i dva poprečna. Platna su najviše isprepletena pa su zbog toga najgušća i najotpornija na opadanje vlakana iz tkanine. Panama vez, koji je varijanta platna, prikazan je na slici 10. Panama vez sastoji se od dvostrukih niti u osnovi s različitim gustoćama (slično kao tkanje košara).



*Slika 10. Panama vez [4]*

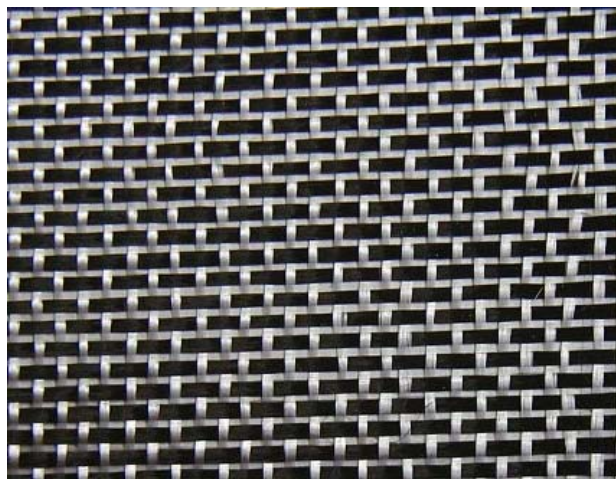
Saten tkanja predstavljaju skupinu pletiva sa minimalnom isprepletenošću. Saten tkanine imaju nisku otpornost na ispadanje vlakana iz tkanine i lako se oblikuju na zakrivljenim podlogama kao što je spoj trupa i krila zrakoplova. Ovo je jedan od razloga zbog čega se Saten tkanine upotrebljavaju u zrakoplovstvu. Na slici 11 prikazano je saten tkanje.



*Slika 11. Saten tkanje [4]*

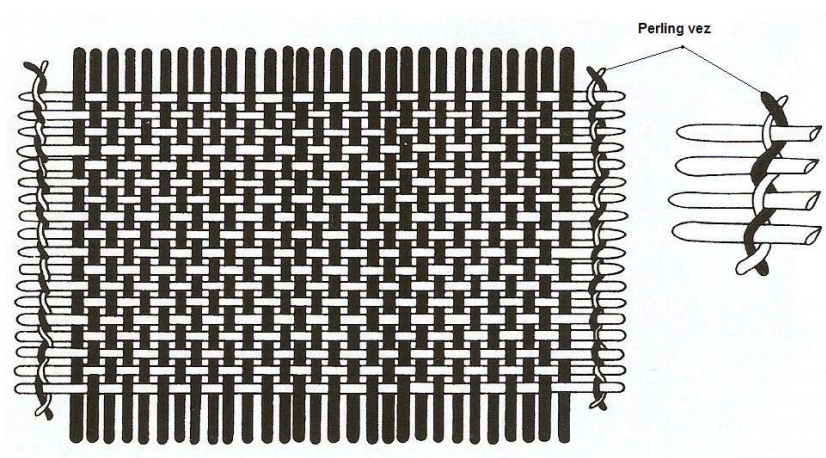


Najbolja mehanička svojstva laminata mogu se postići jednosmjernim pletivima koja su usmjerena u smjeru opterećenja. Što je veća isprepletenost, za danu veličinu vlakana, niži je broj vlakana u tkanini. Razmak između vlakana smanjuje njihov broj u tkanini. Zbog tog razloga u tkaninu se mora postaviti što je više vlakana moguće kako bi se dobila bolja fizikalna svojstva. Nedostatak je anizotropnost svojstava takvih kompozita pa se zbog toga koriste samo u specijalnim slučajevima. Na slici 12 je prikazano jednosmjerno tkanje.



Slika 12. Jednosmjerna tkanja [4]

Sukljani vez koristi se samo u posebnim slučajevima tkanina, kao što je porubljivanje tkanine, a izrađuju se na šivaćim strojevima. Sukljani vez zatvaraju otvorene rubove tkanina. Sukljani vez spriječavaju paranje ruba tkanine prilikom rukovanja ali nisu dobra za održavanje dobrih fizikalnih svojstava laminata. Na slici 13 je prikazan sukljani vez.



Slika 13. Sukljani vez [2]

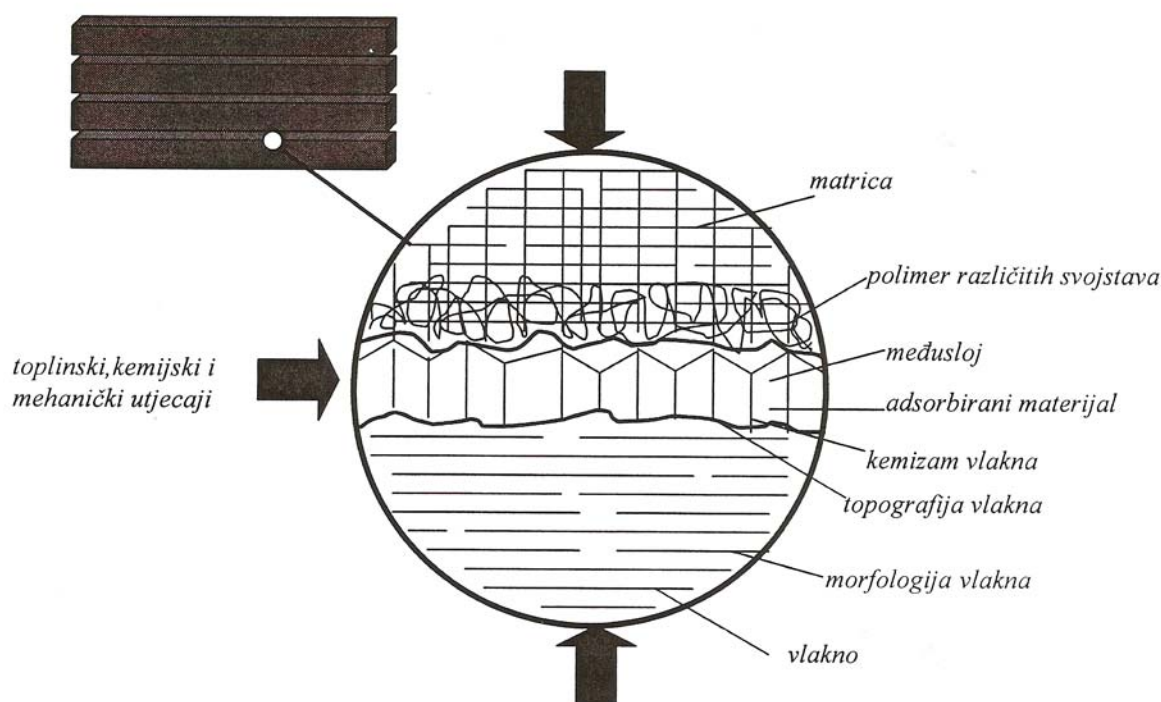
## 5. MEĐUPOVRŠINE I MEĐUSLOJEVI

Adhezija između vlakna i matrice je neophodan kriterij za postizanje zadovoljavajućih svojstava kompozita.

Adhezija je dinamički proces koji može biti podložen raznim uvjetima prilikom pripreme kompozita, a koji mogu utjecati na konačna svojstva kompozita.

Ako je između vlakna i matrice postignuta adhezija dobra, mehanička svojstva kompozita su poboljšana.

Po definiciji, međusloj postoji od neke točke u vlaknu gdje se početna svojstva vlakna počinju mijenjati u lokalna svojstva preko međupovršine vlakno-matrica do neke točke u matrici gdje se ponovno lokalna svojstva počinju mijenjati u početna svojstva matrice (slika 14).





Unutar ovog područja mogu se identificirati razne komponente poznatog i nepoznatog utjecaja na međusloj.

Primjerice, vlakno može sadržavati takvu morfologiju blizu površine vlakna koja nije prisutna unutar samog vlakna. Površina vlakna može biti puno veća od samih dimenzija vlakana zbog prisutnosti pora, jamica ili pukotina na površini. Atomska i molekularna struktura vlakna može biti drugačija nego u samoj jezgri vlakna. Modificiranje površine može dodati kemijske spojeve ili ukloniti početnu površinu zbog čega može doći do promijene kemijskih svojstava u tom području. Izlaganje kompozita zraku prije uporabe može rezultirati adsorpcijom kemijskih spojeva koji mogu povisiti ili eliminirati reaktivnost površine.

Ovi adsorbirani elementi mogu prouzročiti nastanak praznina unutar međusloja.

Termodinamička površinska energija vlakana je rezultat utjecaja navedenih čimbenika. Potreban uvjet za prihvatljivu međupovršinsku interakciju između ojačala i matrice je određen slobodnom površinskom energijom i vlakna i matrice. Ovo znači da površinska energija vlakna mora biti veća nego površinska energija matrice.

Prilikom spajanja vlakana i matrice dolazi do formiranja kemijskih i fizikalnih veza na međupovršini. Površinski kemijski spojevi reagiraju s kemijskim spojevima u matrici pri čemu nastaju kemijske veze. Također, mogu se formirati Van der Waals-ove, vodikove i elektrostatičke veze što ovisi o vrsti spoja. Broj i vrsta veze jako utječe na adheziju između vlakna i matrice.

Na strukturu i svojstva matrice unutar međusloja može utjecati i blizina površine vlakana. Prisutnost vlakna, njegova kemijska i fizikalna svojstva, mogu promijeniti lokalnu morfologiju matrice unutar međusloja.

Razne nečistoće prilikom pripreme kompozita mogu difundirati u međusloj prilikom čega može doći do sniženja mehaničkih svojstava kompozita.

Svaka od ovih pojava može varirati i mogu se pojaviti istovremeno unutar međusloja. Ovisno o materijalima koje koristimo za izradu kompozita, međusloj se može formirati od samo nekih ili od svih materijala koji čine kompozit, a debljina sloja se kreće od nekoliko nanometara do nekoliko tisuća nanometara.

Struktura međusloja može imati veliki utjecaj na svojstva kompozita kao što su mehanička čvrstoća te kemijska i toplinska otpornost.

## 5.1 Sposobnost kvašenja

Kako bi se postigla zadovoljavajuća svojstva kompozita potrebno je osigurati potpuni prodor vlakana unutar matrice. Prodor vlakana u matricu je ograničen sposobnošću kvašenja.

Sposobnost kvašenja vlakana polimernom matricom je potreban preduvjet prilikom pripreme kompozita. Često mikroskopske analize lomne površine ojačala kompozita prikazuju nezaštićene površine ojačala i/ili prisutnost praznina što ukazuje na slabo kvašenje.

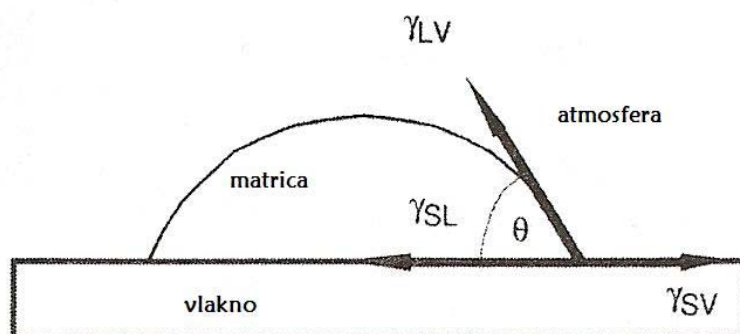
Često su slaba mehanička svojstva kompozita pripisana lošoj adheziji koja je povezana sa slabim kvašenjem.

Smatra se da postoji veza između kemije površine vlakana, slobodne površinske energije matrice, kvašenja vlakno-matrica i adhezije između vlakna i matrice.

Sposobnost kvašenja neke površine može se objasniti na primjeru kapljevine koja je uravnotežena na nekoj čvrstoj površini.

Kapljevine koja dolazi u kontaktu sa čvrstom površinom će se spontano formirati u kap ili će se razliti po površini čvrstog tijela. Razlog tome je površinska napetost kapljevine i površinska napetost čvrstog tijela.

Ako se na površini čvrstog tijela formira kap, ostvariva je veza između površinskih napetosti kapljevine i čvrstog tijela koja se može opisati pomoću vektora koji djeluju na rubu kapi (slika 15).



Slika 15. Shematski prikaz kontaktnog kuta i površinskih napetosti [2]

Slobodna površinska energija međupovršine vlakno-matrica se opisuje pomoću izraza:

$$\gamma_{SV} = \gamma_{SL} + \gamma_{LV} \cos \theta \quad [1]$$

gdje je:  $\gamma_{SL}$  – slobodna površinska energija međupovršine vlakno-matrica

$\gamma_{SV}$  – površinska napetost čvrstog tijela

$\gamma_{LV}$  – površinska napetost kapljevine

$\theta$  – kut između površine kapi i površine čvrstog tijela

Kapljevine koje formiraju kontaktni kut s čvrstim tijelom većim od  $90^\circ$  ne kvase površinu, dok kapljevine koje formiraju kontaktni kut manji od  $90^\circ$  kvase površinu čvrstog tijela.

Ako se na površini čvrstog tijela ne formira kap nego se kapljevina razlije po površini, tada kontaktni kut iznosi  $0^\circ$  pri čemu proizlazi jednadžba:

$$\gamma_{SV} - \gamma_{SL} \geq \gamma_{LV} \quad [2]$$

Bilo da kapljevina kvasi površinu ili da je ne kvasi, površinska napetost kapljevine mora biti veća od površinske napetosti čvrstog tijela.

Da bi prilikom pripreme kompozita međusloj bio pravilno formiran površine se moraju kemijski obraditi, a na ojačala se moraju nanijeti prevlake kako bi ih zaštitili od mehaničkog oštećivanja. Ovim postupcima se smanjuje kontaktni kut između vlakna i matrice što u konačnici doprinosi smanjenju sadržaja vlage i pomaže u uklanjanju šupljina iz kompozita

## 5.2 Značaj adhezije vlakno-matrica

Dobra adhezija potrebna je uzduž cijele granične površine vlakno-matrica kako bi se maksimalno opterećenje moglo prenijeti s polimerne matrice na vlakna.

Kod polimernih kompozita ojačanim anorganskim vlaknima međuslojna adhezija je podijeljena u tri kategorije:

1. Kemijska adhezija zbog formiranja kemijskih veza između površine vlakna i matrice. Staklena vlakna obično se posebno tretiraju vezivnim sredstvima, među kojima su najznačajniji silani, koji mogu kemijski reagirati i s površinom staklenog vlakna i sa smolom kao matricom.
2. Mehanička adhezija odnosi se na hrapavost površine i sposobnost kvašenja matrice. Povećanjem hrapavosti površine vlakna povećava se sposobnost kvašenja.
3. Fizikalna adhezija zbog smanjenja slobodne energije sustava u slučaju kada se dvije površine različitih površinskih napetosti spajaju u obliku međusloja sa međuslojnom napetosti. Termin koji se često upotrebljava za reverzibilno razdvajanje tih dviju površina se naziva adhezijski rad  $W_a$ .

Adhezijski rad je izraz za termodinamički rad potreban za stvaranje površine atmosfera-čvrsto tijelo, a definiran je kao:

$$W_a = \gamma_{LV} + \gamma_{SV} - \gamma_{SL} \quad [3]$$

gdje je:  $\gamma_{SL}$  – slobodna površinska energija međupovršine vlakno-matrica

$\gamma_{SV}$  – površinska napetost čvrstog tijela

$\gamma_{LV}$  – površinska napetost kapljevine

Uvrštavanjem izraza za slobodnu površinsku energiju međupovršine vlakno-matrica u izraz za adhezijski rad dobivamo da je adhezijski rad jednak:

$$W_a = \gamma_{LV} \cdot (1 + \cos \theta) \quad [4]$$

Ovo je izraz za termodinamički rad i kao takav je reverzibilan. Izraz ukazuje na to da se maksimalni rad adhezije pojavljuje kada je kontaktni kut jednak nuli i da je rad adhezije dvostruko veći od površinske napetosti kapljevine.

### **5.3 Utjecaj međusloja na adheziju**

Postoje razna istraživanja o povezanosti međusloja, adhezije vlakno-matrica i mehaničkih svojstava kompozita.

Prilikom pripreme kompozita podjednako je važno obratiti pozornost na stupanj adhezije kao i na pojavu loma. Radni uvjeti u kojima se kompozit nalazi određuju stupanj adhezije i način loma kompozita.

Međusloj koji je formiran prilikom pripreme kompozita ima važnu ulogu kod mehaničkih svojstava kompozita. Također, struktura međusloja utječe na stupanj adhezije koji osigurava kontinuirani prijenos sila sa vlakna na matricu.

Međusloj također djeluje kao slaba točka prilikom loma ojačala pri čemu može doći do loma matrice ili raslojavanja.

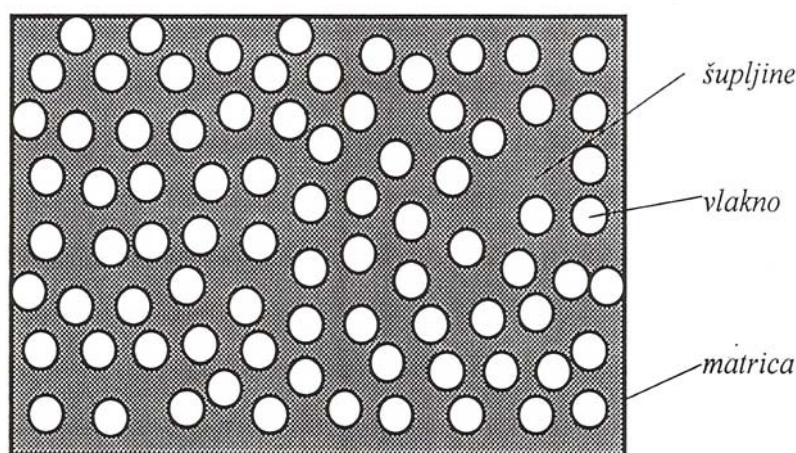
Radi postizanja što je moguće većeg stupnja adhezije, kemijske veze ojačala i matrice moraju biti što jače.

Ako se smatra da međusloj postoji blizu površine vlakna, njegova mehanička svojstva ograničavaju stupanj adhezije. Također, lomna svojstva kompozita ovise o strukturi međusloja i njegovim svojstvima.

## 5.4 Utjecaj šupljina na kvalitetu međusloja

Ponašanje vlaknima ojačanih polimernih kompozita u eksploataciji ovisi o gustoći šupljina na graničnoj površini vlakno-matrica i u međusloju.

Prisutnost šupljina u međusloju je vrlo vjerojatna, a potiču od mjehurića zraka i raznih uključaka nastalih za vrijeme izrade polimernog kompozita (slika 16).



Slika 16. Shematski prikaz šupljina u polimernom kompozitu

Na pojavu i gustoću šupljina u međusloju utječe niz faktora kao što su: matrica (vrsta i kemijski sastav matrice, sposobnost kvašenja, sporedni produkti koji nastaju isparavanjem tijekom očvršćivanja matrice pri visokim temperaturama), vlakna, te postupak izrade polimernog kompozita.

Kritična mjesta u polimernom kompozitu najčešće predstavljaju granične površine vlakno-matrica i međuslojevi zbog slabog kvašenja vlakana matricom. Zato se tijekom izrade većine komercijalnih višeslojnih polimernih kompozita posebna pažnja posvećuje kvaliteti međusloja i određivanju količine šupljina u međusloju.

Uključci zraka koji su potisnuti u polimernu matricu imaju manji utjecaj na konačna svojstva kompozita.

Šupljine se u kompozitima mogu pojaviti u puno različitih oblika i veličina, a nastaju iz dva glavna razloga.

Prvi je ulazak zraka u polimerni kompozit za vrijeme izrade, pri čemu se stvaraju mjehurići zraka u viskoznoj matrici. Mjehurići zraka mogu nastati zbog kemijske reakcije očvršćivanja matrice i pri slabom kvašenju vlakana matricom.

Drugo, šupljine mogu nastati poradi stvaranja rasteznih i tlačnih naprezanja u laminatu zbog različitog ponašanja matrice i vlakana tijekom procesa očvršćivanja matrice.

U vlaknima ojačanim polimernim kompozitima šupljine uzrokuju sniženje mehaničkih svojstava, a posebice međuslojne smične čvrstoće, čvrstoće u smjeru i okomito na smjer vlakana, modula elastičnosti, kao i otpornosti na umor materijala.

## 5.5 Oblici oštećivanja polimernih kompozita

Kako bi se mogla potpunije razumjeti svojstva polimernih kompozita i u najvećoj mogućoj mjeri iskoristiti njihove mehaničke karakteristike potrebno je poznavati ponašanje tih materijala pri mehaničkom ispitivanju.

Razvoj oštećivanja u kompozitnim materijalima je kompleksna pojava, a osnovne vrste oštećivanja koje se javljaju jesu: poprečni lom matrice, odvajanje vlakana i matrice, lom vlakana, popuštanje veze vlakno-matrica i raslojavanje.

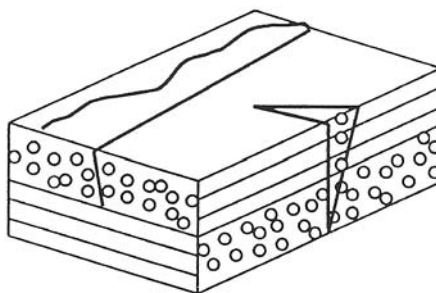
Pri definiranju ovih procesa, značajan je utjecaj vrste ojačanja jer se oblik nastanka oštećivanja bitno razlikuje pri korištenju ugljičnih, staklenih ili aramidnih vlakana.

Razlog pojave loma može biti veliki broj šupljina koje su nastale tijekom izrade kompozita.

Postoji najmanje dva osnovna tipa loma laminata.

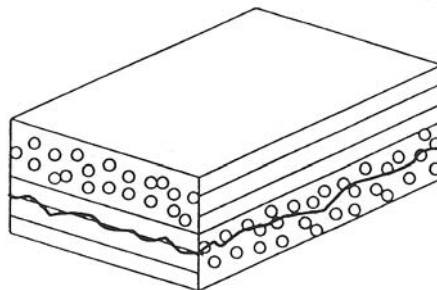
**Lom unutar sloja:** mikronapukline se nakupljaju u vlaknima ili polimernoj matrici laminata. Mikronapukline u vlaknima su kratke i slučajno raspoređene. Pri naprezanju dolazi do loma vlakana i prekidanja veze vlakno-matrica.

Mikronapukline u matrici se spajaju i protežu uzduž vlakana (slika 17).



Slika 17. Shematski prikaz loma laminata unutar sloja

**Lom između slojeva (raslojavanje):** lom počinje na rubovima laminata, na mjestima velikih naprezanja zbog kojih se javljaju mikronapukline između slojeva koje se mogu proširiti kroz cijeli laminat i podijeliti ga u dva dijela (slika 18).



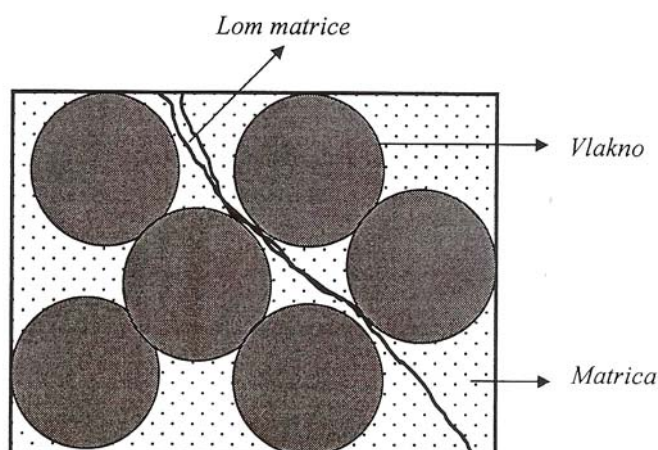
Slika 18. Shematski prikaz loma laminata između slojeva (raslojavanje)

Posebno su opasne greške skrivene između unutarnjih slojeva laminata koje vizualno nije moguće uočiti, a pri njihovoj pojavi dolazi do znatnog smanjenja čvrstoće.

Konstrukcija postaje osjetljivija na tlačna opterećenja u ravnini ploče koja mogu izazvati izvijanje koje uzrokuje raslojavanje.

Lom matrice događa se iz dva razloga: uslijed smicanja, u kojem slučaju direktno ovisi o veličini sile opterećenja, te uslijed savijanja gdje je presudna savojna krutost laminata.

Shematski prikaz pojave loma matrice polimernog kompozita prikazan je na slici 19.



Slika 19. Shematski prikaz loma matrice polimernog kompozita



## 6. EKSPERIMENTALNI DIO

U svrhu određivanja utjecaja procesa umreživanja na svojstva kompozita, pripremljen je sljedeći kompozitni materijal:

Matrica: poliesterska smola na osnovi izoftalne kiseline

Ojačalo: staklena vlakna u obliku tkanine, tipa roving

Postavljena su tri sloja tkanine. Poliesterskoj smoli je dodano 1% katalizatora i 0,5% ubrzavala. Napravljene su dvije kompozitne ploče: prva ploča je umreživana pri sobnoj temperaturi, a druga ploča je umreživana 40 minuta u termostatu pri 60°C. Zatim su iz ploča izrezane epruvete.

Kako bi se ustanovio utjecaj uvjeta umreživanja priprave kompozita na svojstva provedena su određivanja sljedećih svojstava:

- Udarne žilavost
- Međuslojna čvrstoća
- Tvrdća
- Sadržaj šupljina

### 6.1 Određivanje udarne žilavosti (EN ISO 179-1;2000)

Udarne žilavost se određuje prema normi EN ISO 179-1;2000 na Charpy-evom bat. Različiti parametri prilikom ispitivanja su definirani za razne materijale. Ova metoda se primjenjuje za ispitivanje ponašanja uzoraka pod udarnim opterećenjima. Također ovom metodom možemo usporediti dobivene rezultate za slične tipove materijala.

Epruveta (ispitni uzorak) se postavlja na nosač tako da su krajevi uzorka oslonjeni poput horizontalne grede. Zatim bat slobodnim padom udara u sredinu epruvete. U slučaju zarezane epruvete, bat udara sa suprotne strane epruvete gdje nema zareza. Energija kojom bat udara u epruvetu iznosi 4,0 J.

U slučaju da nije moguća izrada epruveta normom propisanih dimenzija ili ako ne puknu, pa se preporučuje povećanje dužine, dužina  $l$  određuje se prema izrazu:

$$l = 25 \cdot h \quad [5]$$

, a razmak između oslonaca se računa prema:

$$L = 20 \cdot h \quad [6]$$

Udarna žilavost se za epruvete bez zareza,  $a_{cU}$ , izračunava prema:

$$a_{cU} = \frac{E_c}{h \cdot b} \cdot 10^3, \text{ J/mm}^2 \quad [7]$$

gdje je:  $a_{cU}$  – udarna žilavost,  $\text{J/mm}^2$

$E_c$  – utrošena energija,  $\text{J}$

$h$  – debljina epruvete,  $\text{mm}$

$b$  – širina epruvete,  $\text{mm}$

Udarna žilavost za epruvete sa zarezom,  $a_{cN}$ , računa se prema:

$$a_{cN} = \frac{E_c}{h \cdot b_N} \cdot 10^3, \text{ J/mm}^2 \quad [8]$$

gdje je:  $a_{cN}$  – udarna žilavost,  $\text{J/mm}^2$

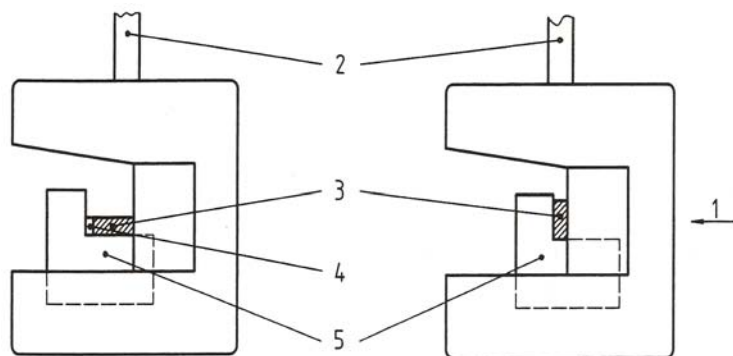
$E_c$  – utrošena energija,  $\text{J}$

$h$  – debljina epruvete,  $\text{mm}$

$b_N$  – širina epruvete,  $\text{mm}$

Na slici 20 prikazan je način postavljanja epruvete bez zareza i sa zarezom. Uređaji za ispitivanje :

- Charpy-ev bat
- mikrometar

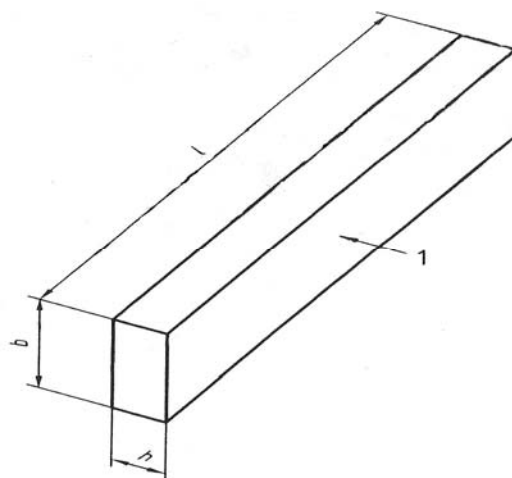


Slika 20. Charpy-ev bat

Oznake :

- 1 – Smjer udarca bata
- 2 – Nosač bata
- 3 – Epruveta
- 4 – Mjesto zareza
- 5 – Oslonac

Iz ploče, koja je umreživana pri sobnoj temperaturi, izrezano je pet epruveta. Oblik epruveta je prikazan na slici 21.



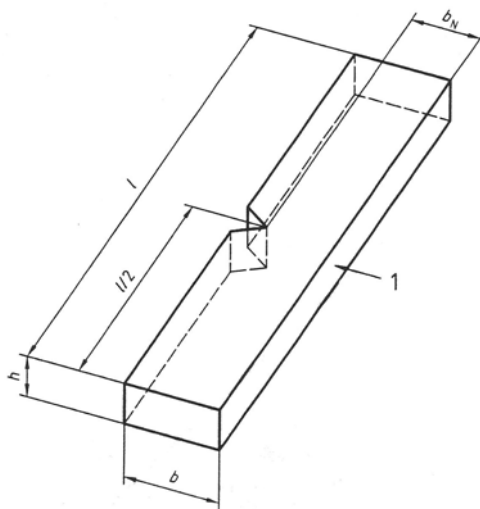
Slika 21. Epruveta

Oznake :

- $l$  – dužina epruvete
- $b$  – širina epruvete
- $h$  – debljina epruvete
- $1$  – smjer udara

Iz ploče koja je umreživana u termostatu pri  $60^{\circ}\text{C}$  izrezano je pet epruveta istog oblika i dimenzija.

Na isti način je izrezano 5 epruveta iz svake ploče kako bi se ispitao utjecaj zarezna na žilavost.

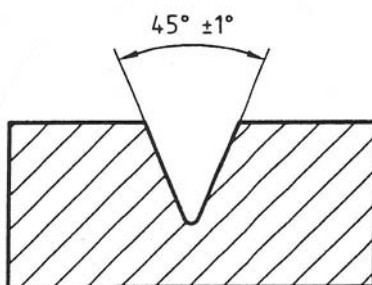


Slika 22. Epruveta sa jednim zarezom

Oznake :

- $l$  – dužina epruvete
- $h$  – debljina epruvete
- $b$  – širina epruvete
- $b_N$  – širina epruvete do zarezna
- $l/2$  – duljina epruvete do sredine zarezna
- 1 – smjer udara

Zarezi na epruvetama su napravljeni prema normi ISO 2818. Profil zarezna prikazan je na slici 23.



Slika 23. Standardni oblik zarezna

### 6.1.1 Rezultati ispitivanja udarne žilavosti

U tablici 6 prikazane su izračunate srednje vrijednosti udarne žilavosti za epruvete bez zareza i sa zarezom izrezane iz ploča koje su bile spravljene prije godinu dana i tada ispitivane.

**Tablica 6:** Srednje vrijednosti udarne žilavosti epruveta ispitanih prije godinu dana

<b><i>Ispitni uzorak (epruveta)</i></b>	<b><i>Udarne žilavost, <math>a_{cU}, J / mm^2</math></i></b>	<b><i>Udarne žilavost, <math>a_{cN}, J / mm^2</math></i></b>
<b><i>sobna temperatura, bez zareza</i></b>	<b><i>81</i></b>	<b><i>...</i></b>
<b><i>60°C, bez zareza</i></b>	<b><i>87</i></b>	<b><i>...</i></b>
<b><i>sobna temperatura, sa zarezom</i></b>	<b><i>...</i></b>	<b><i>108</i></b>
<b><i>60°C, sa zarezom</i></b>	<b><i>...</i></b>	<b><i>119</i></b>

U tablicama 7, 8, 9 i 10 prikazane su izračunate vrijednosti udarne žilavosti za epruvete koje su ispitivane godinu dana nakon spravljanja kompozitnih ploča. Ploče su odložene na godinu dana pri sobnoj temperaturi.

U tablici 7 prikazane su izračunate vrijednosti udarne žilavosti za epruvete bez zareza izrezane iz ploče umreživane pri sobnoj temperaturi. Epruvete su udarane okomito na smjer ojačala.

**Tablica 7:** Rezultati udarne žilavosti za epruvete bez zareza umreživane pri sobnoj temperaturi

Redni broj epruvete	Debljina epruvete, $h$ , [mm]	Širina epruvete, $b$ , [mm]	Presjek epruvete, $A$ , [mm <sup>2</sup> ]	Razmak između oslonaca, $L$ , [mm]	Utrošena energija, $E_c$ , [J]	Udarne žilavost, $a_{cU}$ , [J/mm <sup>2</sup> ]
1	4,0	9,8	39,2	62	3,55	90
2	4,1	9,9	40,59	62	3,9	96
3	4,0	10,1	40,4	62	3,4	84
4	3,8	10,2	38,76	62	3,96	102
5	4,0	10,2	40,8	62	3,65	89
Srednja vrijednost, $X$						92

U tablici 8 prikazane su izračunate vrijednosti udarne žilavosti za epruvete bez zareza izrezane iz ploče umreživane u termostatu pri 60°C. Epruvete su udarane okomito na smjer ojačala.

**Tablica 8:** Rezultati udarne žilavosti za epruvete bez zareza umreživane u termostatu pri 60°C

Redni broj epruvete	Debljina epruvete, $h$ , [mm]	Širina epruvete, $b$ , [mm]	Presjek epruvete, $A$ , [mm <sup>2</sup> ]	Razmak između oslonaca, $L$ , [mm]	Utrošena energija, $E_c$ , [J]	Udarne žilavost, $a_{cU}$ , [J/mm <sup>2</sup> ]
1	3,7	9,9	36,63	62	3,9	106
2	4,0	9,7	38,8	62	3,87	100
3	4,0	10,0	40,0	62	3,86	96
4	3,9	10,0	39,0	62	3,76	96
5	4,1	10,0	41,0	62	3,87	94
Srednja vrijednost, $X$						98

U tablici 9 prikazane su izračunate vrijednosti udarne žilavosti za epruvete sa zarezom koje su izrezane iz ploče umreživane pri sobnoj temperaturi. Epruvete su udarane u smjeru ojačala.

**Tablica 9:** Rezultati udarne žilavosti za epruvete sa zarezom umreživane pri sobnoj temperaturi

Redni broj epruvete	Debljina epruvete, $h$ , [mm]	Širina epruvete do zarez, $b_N$ , [mm]	Presjek epruvete, $A$ , [mm <sup>2</sup> ]	Razmak između oslonaca $L$ , [mm]	Utrošena energija, $E_c$ , [J]	Udarne žilavost, $a_{cN}$ , [J/mm <sup>2</sup> ]
1	3,7	7,91	29,26	62	3,45	118
2	3,9	7,9	30,81	62	2,85	93
3	3,5	7,6	26,6	62	2,85	107
4	3,8	7,51	28,53	62	2,65	93
5	3,9	7,99	31,16	62	2,6	84
Srednja vrijednost, $X$						99

U tablici 10 prikazane su izračunate vrijednosti udarne žilavosti za epruvete sa zarezom izrezane iz ploče umreživane u termostatu pri 60°C. Epruvete su udarane u smjeru ojačala.

**Tablica 10:** Rezultati udarne žilavosti za epruvete sa zarezom umreživane pri 60°C

Redni broj epruvete	Debljina epruvete, $h$ , [mm]	Širina epruvete do ureza $b_N$ , [mm]	Presjek epruvete, $A$ , [mm <sup>2</sup> ]	Razmak između oslonaca, $L$ , [mm]	Utrošena energija, $E_c$ , [J]	Udarne žilavost, $a_{cN}$ , [J/mm <sup>2</sup> ]
1	3,7	7,73	28,6	62	3,0	105
2	3,6	7,74	27,86	62	2,8	101
3	3,7	7,88	29,15	62	2,95	101
4	3,5	7,61	26,63	62	2,7	102
5	3,5	7,86	27,51	62	3,8	138
Srednja vrijednost, $X$						109



U tablici 11 uspoređeni su rezultati srednjih vrijednosti udarne žilavosti ispitnih uzoraka (epruveta).

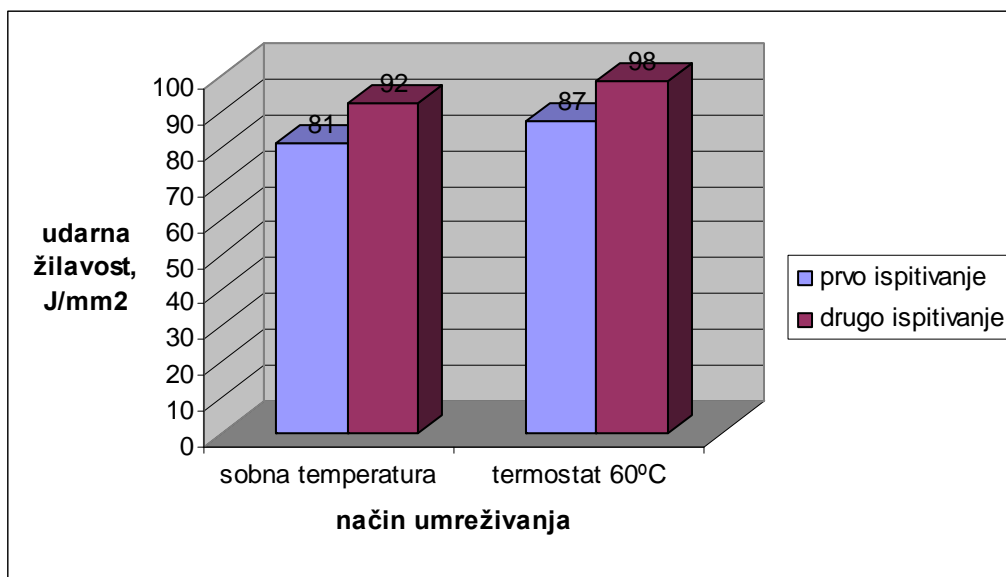
**Tablica 11:** Srednje vrijednosti udarne žilavosti

<b>Ispitni uzorak (epruveta)</b>	<b>Udarne žilavost, <math>a_{cU}, J / mm^2</math></b>	<b>Udarne žilavost, <math>a_{cN}, J / mm^2</math></b>
<i>sobna temperatura, bez zareza</i>	<b>92</b>	...
<i>60°C, bez zareza</i>	<b>98</b>	...
<i>sobna temperatura, sa zarezom</i>	...	<b>99</b>
<i>60°C, sa zarezom</i>	...	<b>109</b>

Rezultati udarne žilavosti kod epruveta ispitivanih prije godinu, neposredno nakon priprave kompozita, ukazuju da epruvete s obzirom na način umreživanja imaju različite vrijednosti udarne žilavosti. Kod epruveta bez zareza i sa zarezom veću vrijednost udarne žilavosti imaju epruvete koje su umreživane pri 60°C.

Isti zaključak može se primjeniti i za epruvete koje su ispitivane godinu dana nakon spravljanja kompozitnih ploča.

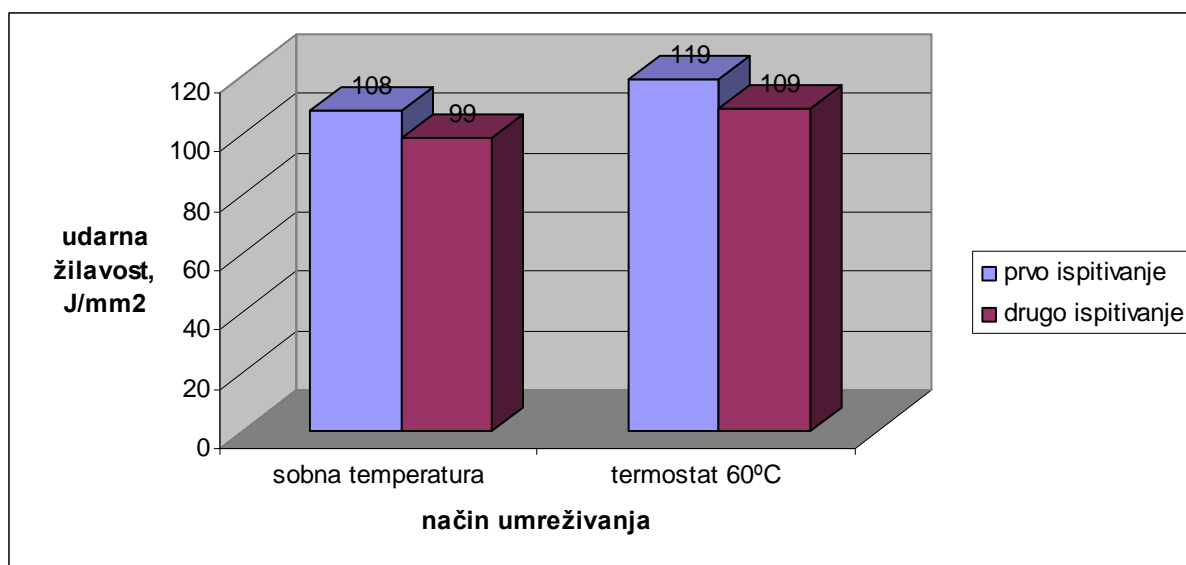
Međutim usporedbom navedenih rezultata s rezultatima udarne žilavosti epruveta bez zareza ispitivanih prije godinu dana ukazuje na to da je došlo do povećanja udarne žilavosti kod epruveta izrezanih iz ploča koje su bile odložene na godinu dana pri sobnoj temperaturi. Do povećanja udarne žilavosti došlo je i kod ploča koje su umreživane pri sobnoj temperaturi i kod ploča koje su umreživane u termostatu pri 60°C (slika 24).



Slika 24. Promjena udarne žilavosti za epruvete bez zareza nakon godine dana

Rezultati ispitivanja udarne žilavosti kod epruveta sa zarezom razlikuju se od onih bez zareza u tome što su vrijednosti udarne žilavosti manje kod epruveta koje su izrezane iz ploča koje su odstajale godinu dana od onih ispitivanih godinu dana prije.

Do smanjenja udarne žilavosti je došlo i kod epruveta izrezanih iz ploča koje su umreživane pri sobnoj temperaturi i kod onih izrezanih iz ploča koje su umreživane u termostatu pri 60°C (slika 25).



*Slika 25. Smanjenje udarne žilavosti kod epruveta sa zarezom ispitivanih nakon godinu dana*

## 6.2 Određivanje prividne međuslojne smične čvrstoće metodom kratke grede (EN ISO 14130)

Za ispitivanje međuslojne smične čvrstoće polimernih kompozita primjenjuju se različite metode koje se međusobno razlikuju po obliku i dimenzijama epruveta i po načinu opterećivanja (savojno, vlačno, tlačno, itd.).

Metoda EN ISO 14130 specificira određivanje prividne smične čvrstoće vlaknom ojačanih polimernih kompozita metodom kratke grede.

Međuslojna smična čvrstoća polimernih kompozita ojačanih vlaknima određuje se najčešće savijanjem epruvete na tri točke pri vrlo malom razmaku između oslonaca.

Prividna međuslojna smična čvrstoća  $\tau_M$  je vrijednost prividnog smičnog naprezanja pri lomu ili kada je opterećenje maksimalno.

Ispitivanje se provodi na univerzalnoj kitalici za ispitivanje mehaničkih svojstava, a brzina ispitivanja iznosi  $1\text{ mm/min} \pm 0,2\text{ mm/min}$  (slika 26).



Slika 26. Univerzalna kitalica

U tablici 12 navedene su normirane dimenzije ispitaka.

**Tablica 12:** Normirane dimenzije ispitaka

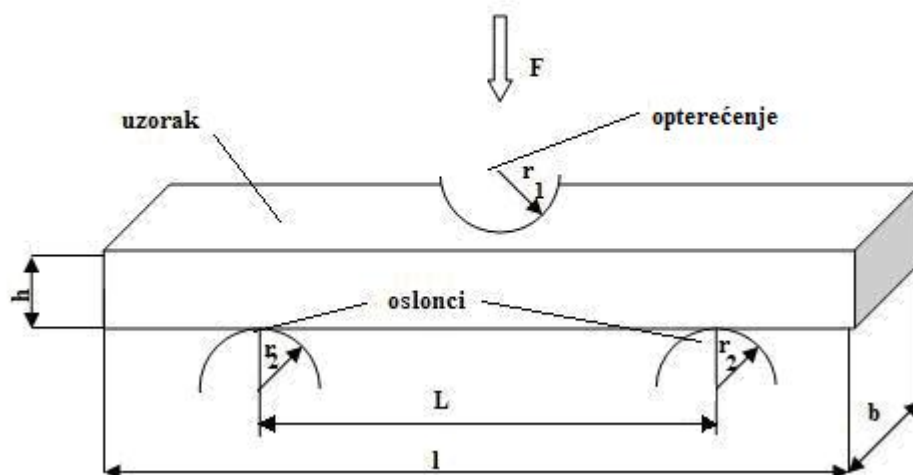
Debljina, $h$ , mm	Ukupna dužina, $l$ , mm	Širina, $b$ , mm
$2 \pm 0,2$	$20 \pm 1$	$10 \pm 0,2$

Kada nije moguće ili nisu poželjne propisane dimenzije ispitka treba se pridržavati sljedećih pravila: -dužina ispitka iznosi:  $l=10h$  [9]

-širina ispitka iznosi:  $b=5h$  [10]

-razmak između oslonaca iznosi:  $L=5h \pm 0,3$  mm [11]

Epruveta pravokutnog poprečnog presjeka i debljine  $h$  na dva oslonca razmaka  $L$  opterećena je jednoliko kontinuirano prema slici 27.



Slika 27. Oblik ispitka i način djelovanja opterećenja

Kao opterećenje na ispitak djeluje čelična kuglica polumjera  $r_1$ , a oslonci su u obliku polukruga sa polumjerom  $r_2$ . Ova dva polumjera su također propisana normom i iznose:

$$r_1 = 5 \pm 0,2 \text{ mm} \quad [12]$$

$$r_2 = 2 \pm 0,2 \text{ mm} \quad [13]$$

Ispitak se opterećuje do loma, a maksimalna sila pri kojoj nastaje lom uzima se kao mjera za međuslojnu čvrstoću kompozita.

Izračunavanje međuslojne čvrstoće dan je prema izrazu:

$$\tau = \frac{3 F_{\max}}{4 b \cdot h} \quad [14]$$

gdje je:  $\tau$  – međuslojna čvrstoća,  $\text{N/mm}^2$

$F_{\max}$  – opterećenje pri lomu, N

$b$  – širina ispitka, mm

$h$  – debljina ispitka, mm

Način postavljanja epruvete na kidalicu je prikazan na slici 28.



Slika 28. Postavljanje epruvete u napravu za stezanje

### 6.2.1 Rezultati ispitivanja prividne međuslojne smične čvrstoće

U tablici 13 prikazane su izračunate vrijednosti međuslojne čvrstoće za epruvete izrezane iz ploče umreživane pri sobnoj temperaturi.

**Tablica 13:** Rezultati međuslojne čvrstoće za epruvete umreživane pri sobnoj temperaturi

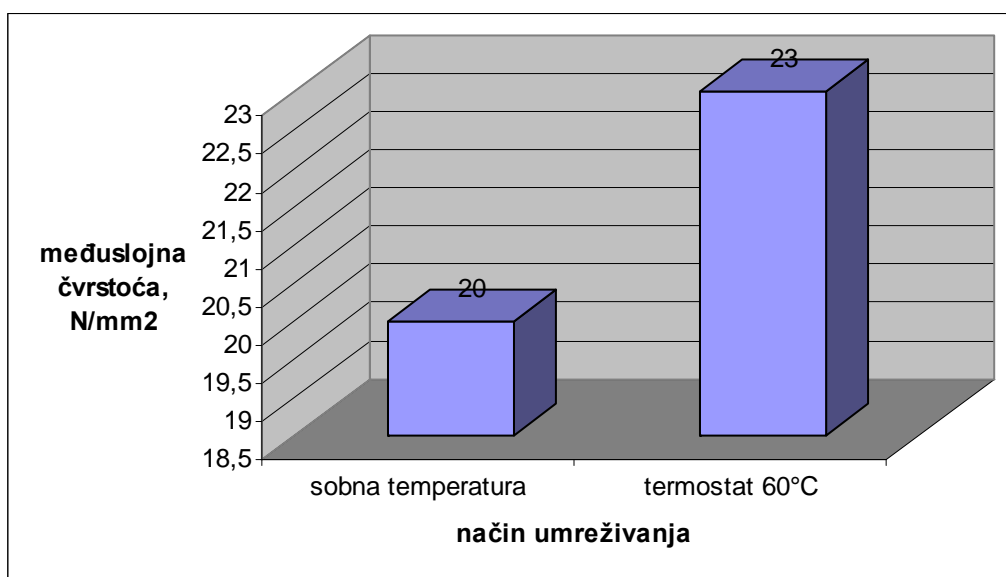
Redni broj epruvete	Debljina epruvete, $h$ , [mm]	Širina epruvete do ureza, $b$ , [mm]	Dužina epruvete, $l$ , [mm]	Razmak između oslonaca, $L$ , [mm]	Opterećenje pri lomu, $F_{max}$ , [N]	Međuslojna čvrstoća $\tau$ , [N/mm <sup>2</sup> ]
1	4,0	20,0	40	19	1960	18
2	4,0	19,9	40	19	2080	20
3	3,7	20,0	37	19	2080	21
4	4,0	19,8	40	19	2180	21
5	4,1	20,0	41	19	2200	20
Srednja vrijednost, $X$						20

U tablici 14 prikazane su izračunate vrijednosti međuslojne čvrstoće za epruvete izrezane iz ploče umreživane u termostatu pri 60°C.

**Tablica 14:** Rezultati međuslojne čvrstoće za epruvete umreživane u termostatu pri 60°C

Redni broj epruvete	Debljina epruvete, $h$ , [mm]	Širina epruvete do ureza, $b$ , [mm]	Dužina epruvete, $l$ , [mm]	Razmak između oslonaca, $L$ , [mm]	Opterećenje pri lomu, $F_{max}$ , [N]	Međuslojna čvrstoća $\tau$ , [N/mm <sup>2</sup> ]
1	3,6	19,9	36	19	2412	25
2	4,1	19,7	41	19	2320	22
3	3,5	19,8	35	19	2700	29
4	3,8	20,0	38	19	2180	22
5	3,9	20,1	39	19	1880	18
Srednja vrijednost, $X$						23

Rezultati ispitivanja ukazuju na povećanu vrijednost međuslojne čvrstoće kod epruveta koje su umreživane u termostatu pri 60°C (slika 29).



Slika 29. Dijagram rezultata srednjih vrijednosti međuslojne čvrstoće



### 6.3 Određivanje tvrdoće (EN ISO 2039-1)

Određivanje tvrdoće provodi se pomoću uređaja Zwick 3106 pri čemu se u ispitak utiskuje čelična kuglica promjera 5 mm (slika 30 a, b). Kao rezultat ispitivanja tvrdoće prema ovoj normi treba navesti dubinu prodiranja, odnosno tvrdoću nakon 10, 30 i 60 sekundi.

Ako nije drugačije navedeno, ispituje se pri  $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  i  $65 \pm 5\%$  relativne vlažnosti zraka.

Opterećenje iznosi:  $F=358 \text{ N}$  tako da dubina prodiranja iznosi  $h=0,13$  do  $0,35 \text{ mm}$ . Opterećenje  $F$  treba se osloboditi u roku od 2 sekunde.

Tvrdoća pri utiskivanju kuglice izražava se u  $\text{N/mm}^2$ , a proračunava se prema:

$$H = 0,0064 \cdot \frac{F}{h} \left[ \text{N/mm}^2 \right] \quad [15]$$

gdje je:  $F$  – opterećenje,  $\text{N}$

$h$  – dubina prodiranja,  $\text{mm}$



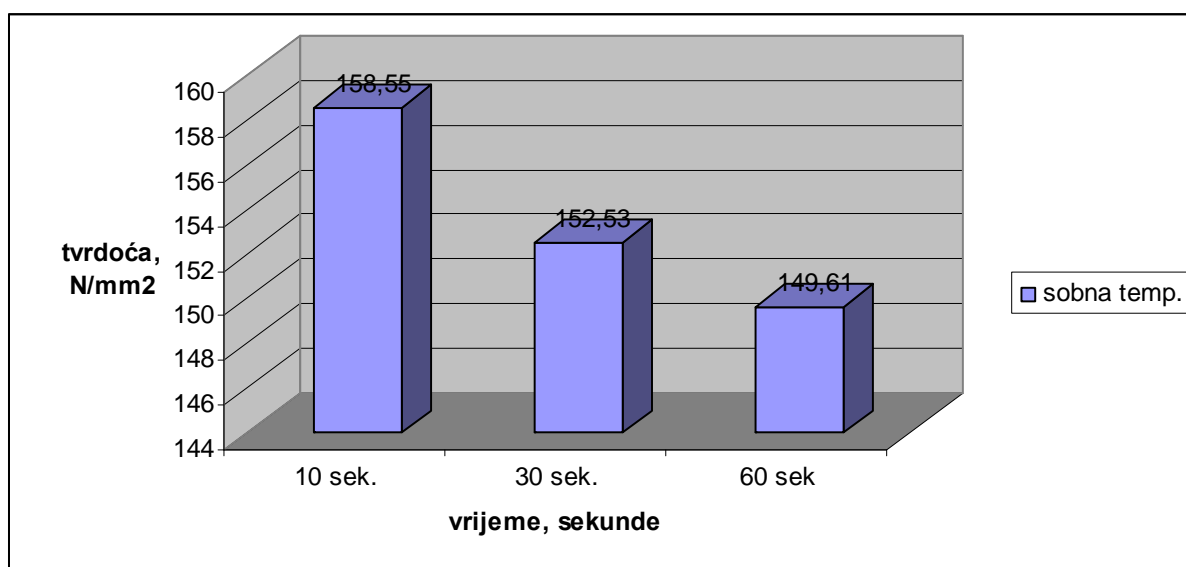
Slika 30. a) Tvrdomjer Zwick 3106, b) Položaj ispitka i način utiskivanja kuglice

### 6.3.1 Rezultati ispitivanja tvrdoće

U tablici 15 prikazani su rezultati ispitivanja tvrdoće za kompozitnu ploču umreživanu pri sobnoj temperaturi.

**Tablica 15:** Rezultati srednjih vrijednosti tvrdoća za kompozit umreživan pri sobnoj temperaturi

Redni broj utiskivanja kuglice	Dubina prodiranja, h nakon 10 sekundi	Dubina prodiranja, h nakon 30 sekundi	Dubina prodiranja, h nakon 60 sekundi
1	0,155	0,16	0,165
2	0,16	0,16	0,165
3	0,145	0,15	0,15
4	0,15	0,155	0,155
5	0,145	0,15	0,155
6	0,135	0,14	0,145
7	0,13	0,14	0,14
8	0,15	0,155	0,16
9	0,14	0,15	0,15
10	0,14	0,145	0,15
Korektura za Zwick, $k=-0,020$	-0,020	-0,020	-0,020
Srednja vrijednost tvrdoće; $H, [N/mm^2]$	158,55	152,53	149,61

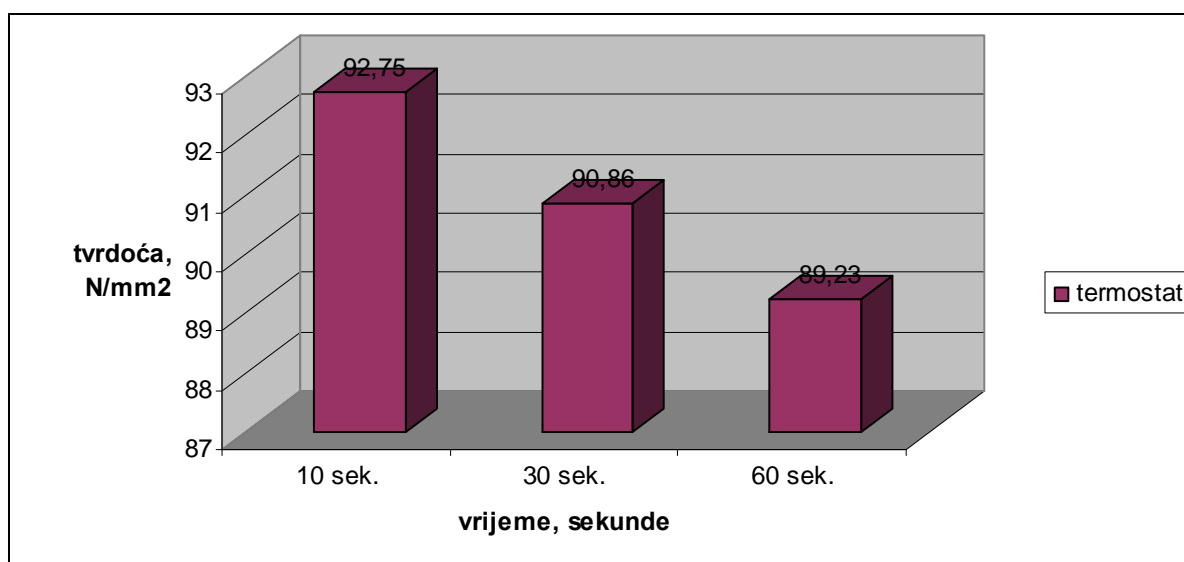


Slika 31. Prikaz rezultata tvrdoće za kompozit umreživan pri sobnoj temperaturi

U tablici 16 prikazani su rezultati ispitivanja tvrdoće za kompozitnu ploču umreživanu u termostatu pri 60°C.

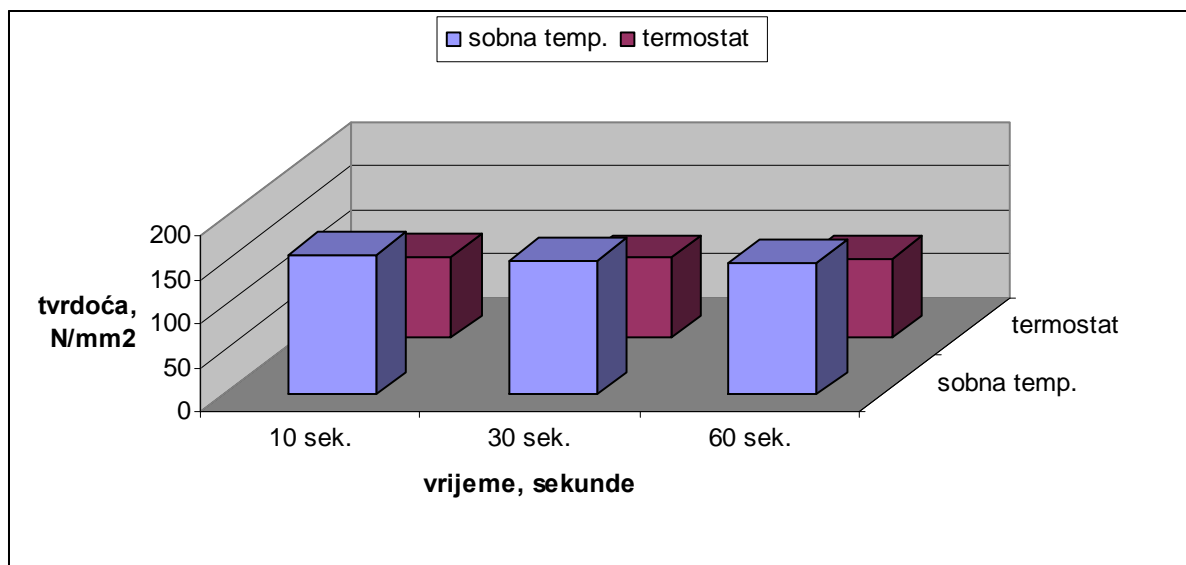
**Tablica 16:** Rezultati srednjih vrijednosti tvrdoća za kompozit umreživan u termostatu pri 60°C

Redni broj utiskivanja kuglice	Dubina prodiranja, h nakon 10 sekundi	Dubina prodiranja, h nakon 30 sekundi	Dubina prodiranja, h nakon 60 sekundi
1	0,235	0,24	0,25
2	0,26	0,265	0,27
3	0,23	0,235	0,235
4	0,335	0,34	0,345
5	0,23	0,235	0,24
6	0,22	0,225	0,225
7	0,235	0,24	0,25
8	0,23	0,235	0,24
9	0,225	0,23	0,235
10	0,32	0,325	0,325
Korektura za Zwick, $k=-0,020$	-0,020	-0,020	-0,020
Srednja vrijednost tvrdoće; $H, [N/mm^2]$	92,75	90,86	89,23



Slika 32. Prikaz rezultata tvrdoće za kompozit umreživan u termostatu pri 60°C

Na slici 33 uspoređeni su rezultati ispitivanja tvrdoće za obje ploče.



Slika 33. Usporedba vrijednosti tvrdoća za oba kompozita

Rezultati ispitivanja ukazuju na povećanu vrijednost tvrdoće kod ploče koja je umreživana pri sobnoj temperaturi.

## 6.4 Određivanje sadržaja šupljina

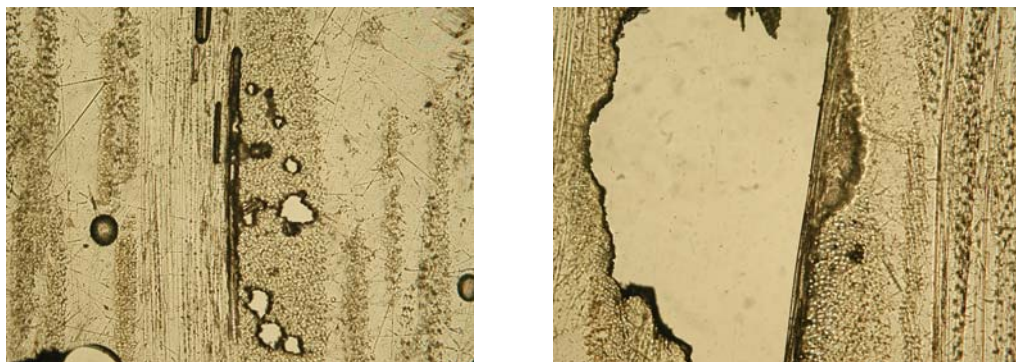
Udio šupljina u kompozitnom materijalu odredio se putem software-skog programa ImageJ. Iz kompozitnih ploča napravljena su četiri izbruska. Dva izbruska iz ploče koja je umreživana u termostatu pri 60°C i dva iz ploče koja je umreživana pri sobnoj temperaturi.

Uzorci su pregledani mikroskopom i zatim snimljeni. Za svaki izbrusak napravljeno je po pet slika.

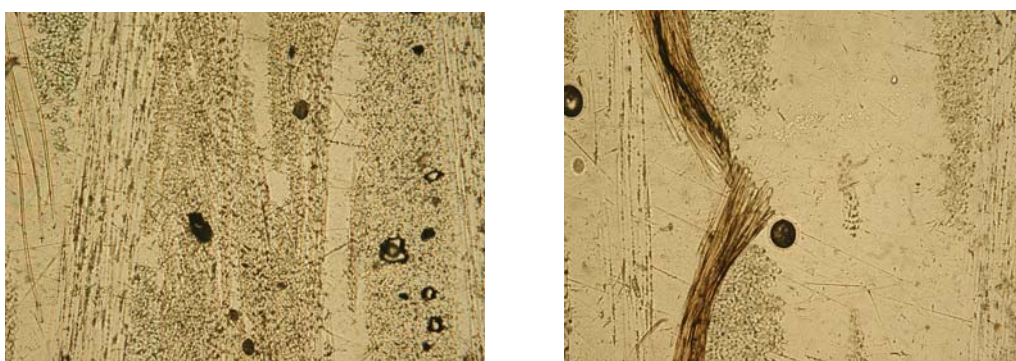
Dobro spravljeni kompozit sadrži udio šupljina do 3%.

Obradom slika kod izbrusaka koji su dobiveni iz ploče koja je umreživana pri sobnoj temperaturi sadržaj šupljina iznosi 13,25% dok kod izbrusaka dobivenih iz druge ploče sadržaj šupljina iznosi 3,66%.

Neke od mikroskopskih slika prikazane su na slici 34 i na slici 35.



*Slika 34. Mikroskopske slike izbruska dobivenog iz kompozita koji je umreživan pri sobnoj temperaturi (povećanje x 100)*



*Slika 35. Mikroskopske slike izbruska dobivenog iz kompozita koji je umreživan u termostatu pri 60°C (povećanje x 100)*

## 6.5 Korelacijska i regresijska analiza rezultata

Za obradu podataka kod dobivanja zavisnosti udarne žilavosti o tvrdoći i udjelu šupljina, te zavisnosti međuslojne čvrstoće o tvrdoći i udjelu šupljina korišten je programski paket Statistica, s time da su zavisne varijable udarna žilavost i međuslojna čvrstoća, a nezavisne varijable su tvrdoća i udio šupljina.

### 6.5.1 Korelacijska i regresijska analiza rezultata za kompozit umreživan pri sobnoj temperaturi

Rezultati ispitivanja su niz vrijednosti nezavisnih varijabli i zavisne varijable. Kod procjenjivanja udarne žilavosti u zavisnosti od tvrdoće i udjelu šupljina korišten je regresijski model. Odnosno, zavisnost udarne žilavosti o tvrdoći i udjelu šupljina proizlazi iz višestruke regresijske analize. Ova analiza zasniva se na statističkoj obradi podataka metodom najmanjih kvadrata. Prvo će se uzeti vrijednosti zavisne i nezavisne varijable iz tablica 7, 13 i 15 za kompozit umreživan pri sobnoj temperaturi. Vrijednosti varijabli uzete su za epruvete bez zareza.

Kvantificiranje odnosa između nezavisnih varijabli, te nezavisnih i zavisne varijable moguće je opisati koeficijentom korelacije. Matrica koeficijenata korelacije između nezavisnih varijabli međusobno, te nezavisnih varijabli i zavisne varijable, prikazana je u tablici 17.

**Tablica 17:** Matrica koeficijenata korelacije za kompozit umreživan pri sobnoj temperaturi

Koeficijent korelacije, <i>r</i>	Udarne žilavost	Tvrdoća	Udio šupljina
Udarne žilavost	1,000000	-0,973712	-0,248910
Tvrdoća	-0,973712	1,000000	0,431422
Udio šupljina	-0,248910	0,431422	1,000000

Koeficijenti korelacije između nezavisnih varijabli ukazuju u kojoj su mjeri promjene pojedinih parametara međusobno povezane.

Testiranjem značajnosti koeficijenata korelacije između nezavisnih varijabli, Studentovim t-testom utvrđeno je da između nezavisnih varijabli ne postoji korelacija. Odnosno može se zaključiti da među obilježjima nezavisnih varijabli ne postoji stohastička veza.

Testiranjem značajnosti utvrđeno je da je zavisna varijabla u stohastičkoj zavisnosti samo s tvrdoćom.

Daljnja analiza rezultata izvršena je pomoću regresije, odnosno na osnovu regresijske obrade može se procijeniti udarna žilavost zavisno od tvrdoće i udjela šupljina.

Proračunom regresije za zavisnu i nezavisne varijable dobiju se koeficijenti regresije, slobodan član, koeficijent višestruke regresije kao i koeficijent determinacije modela regresije (tablica 18).

**Tablica 18:** Rezultati regresijske analize za kompozit umreživan pri sobnoj temperaturi

<i>Nezavisna varijabla</i>	<i>Koeficijent</i>	<i>Standardna greška</i>	<i>Nivo signifikantnosti</i>	<i>t-vrijednost</i>
<i>Konstanta</i>	<b>515,1386</b>	<b>38,59595</b>	<b>0,005567</b>	<b>13,3470</b>
<i>Tvrdoća</i>	<b>-3.0720</b>	<b>0,28354</b>	<b>0,008411</b>	<b>-10,8345</b>
<i>Udio šupljina</i>	<b>3,1351</b>	<b>1,46436</b>	<b>0,165604</b>	<b>2,1409</b>

koeficijent višestruke korelacije:  $r=0,992111$

koeficijent determinacije:  $r^2=0,96857$

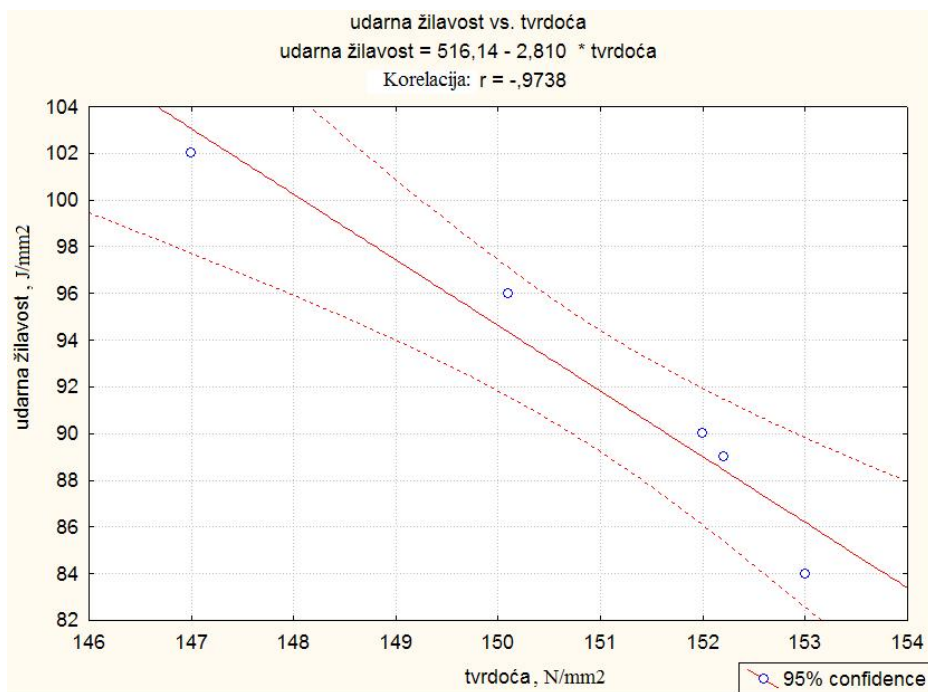
standardna greška procjene:  $s_e=1,2308$

**Tablica 19:** Analiza varijance za regresiju (kompozit umreživan pri sobnoj temperaturi)

<i>Izvor varijance</i>	<i>Suma kvadrata odstupanja</i>	<i>Stupnjevi slobode</i>	<i>Srednja vrijednost kvadrata odstupanja</i>	<i>F-vrijednost</i>
<i>Regresija</i>	<b>189,7703</b>	<b>2</b>	<b>94,88514</b>	<b>62,63628</b>
<i>Greška</i>	<b>3,0297</b>	<b>2</b>	<b>1,51486</b>	

O kvaliteti modela govori koeficijent determinacije, koji predstavlja odnos zbroja kvadrata odstupanja obuhvaćenih regresijom i ukupnog zbroja kvadrata odstupanja zavisne varijable. Koeficijent determinacije,  $r^2=0,96857$ , znači da je 96% zbroja kvadrata odstupanja obuhvaćeno modelom.

Vrijednosti tvrdoće kretale su se u granicama od 147 do 153 tako da je došao do izražaja njezin jak utjecaj na udarnu žilavost. Koeficijent nagiba regresijskog pravca iznosi;  $b_s = -3,0720 \text{ Jmm}^{-2}/\%$ , što ukazuje na izuzetno negativno djelovanje. Odnosno, tvrdoća doprinosi smanjenju udarne žilavosti, slika 36.



Slika 36. Djelovanje tvrdoće na udarnu žilavost kompozita umreživanog pri sobnoj temperaturi



Kod procjenjivanja međuslojne čvrstoće u zavisnosti od tvrdoće i udjela šupljina također je korišten regresijski model kao i kod procjene udarne žilavosti. Međuslojna čvrstoća je zavisna varijabla dok su tvrdoća i udio šupljina nezavisne varijable. Matrica koeficijenata korelacije između nezavisnih varijabli međusobno, te nezavisnih varijabli i zavisne varijable, prikazana je u tablici 20.

**Tablica 20:** Matrica koeficijenata korelacije za kompozit umreživan pri sobnoj temperaturi. Međuslojna čvrstoća u zavisnosti od tvrdoće i udjela šupljina

Koeficijent korelacije, $r$	Međuslojna čvrstoća	Tvrdoća	Udio šupljina
Međuslojna čvrstoća	1,000000	-0,339383	-0,964023
Tvrdoća	-0,339383	1,000000	0,431422
Udio šupljina	-0,964023	0,431422	1,000000

Testiranjem značajnosti koeficijenata korelacije između nezavisnih varijabli, Studentovim t-testom utvrđeno je da između nezavisnih varijabli ne postoji korelacija. Odnosno može se zaključiti da među obilježjima nezavisnih varijabli ne postoji stohastička veza. Testiranjem značajnosti utvrđeno je da je zavisna varijabla u stohastičkoj vezi sa udjelom šupljina.

**Tablica 21:** Rezultati regresijske analize za kompozit umreživan pri sobnoj temperaturi. Međuslojna čvrstoća u zavisnosti od tvrdoće i udjela šupljina

Nezavisna varijabla	Koeficijent	Standardna greška	Nivo signifikantnosti	t-vrijednost
Konstanta	46,90398	13,68324	0,075583	3,42784
Tvrdoća	0,04786	0,10052	0,680924	0,47613
Udio šupljina	-2,64120	0,51915	0,036531	-5,08753

koeficijent višestruke korelacije:  $r=0,96774$

koeficijent determinacije:  $r^2=0,87306$

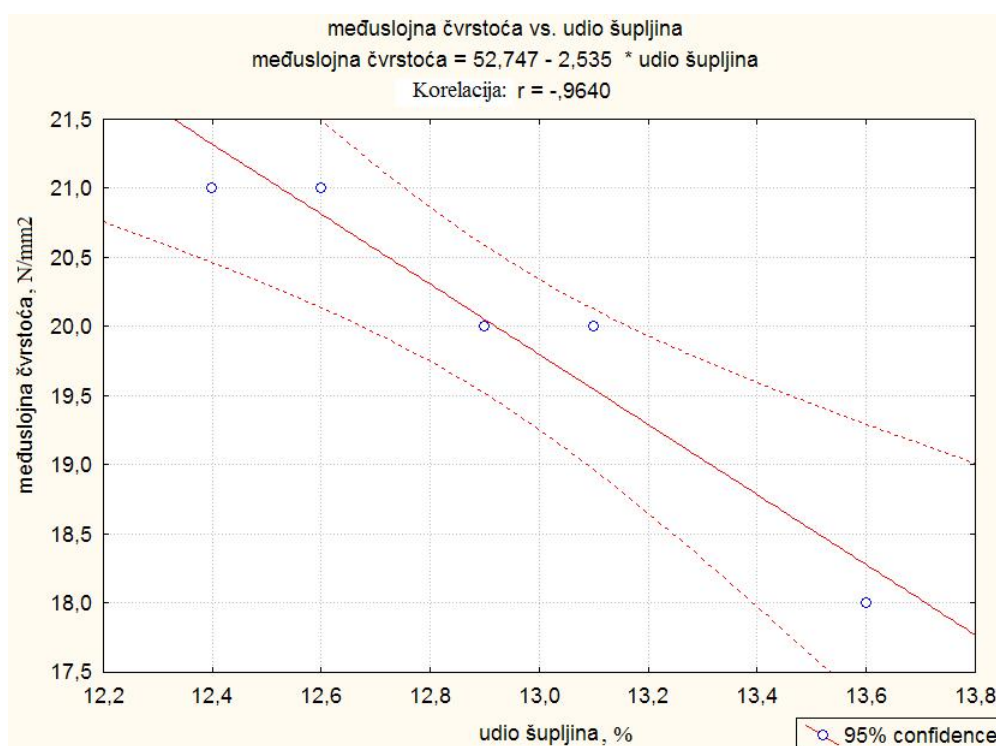
standardna greška procjene:  $s_e=0,43635$

**Tablica 22:** Analiza varijance za regresiju (kompozit umreživan pri sobnoj temperaturi).  
Međuslojna čvrstoća u zavisnosti od tvrdoće i udjela šupljina

Izvor varijance	Suma kvadrata odstupanja	Stupnjevi slobode	Srednja vrijednost kvadrata odstupanja	F-vrijednost
Regresija	5,619200	2	2,809600	14,75632
Greška	0,380800	2	0,190400	

Koeficijent determinacije,  $r^2=0,87306$ , znači da je 87% zbroja kvadrata odstupanja obuhvaćeno modelom.

Vrijednosti udjela šupljina kretale su se u granicama od 12,4 do 13,6. Koeficijent nagiba regresijskog pravca iznosi;  $b_s=-2,64120 \text{ Jmm}^{-2}/\%$ , što ukazuje na negativno djelovanje. Odnosno, udio šupljina doprinosi smanjenju međuslojne čvrstoće, slika 37.



Slika 37. Djelovanje udjela šupljina na međuslojnu čvrstoću kompozita umreživanog pri sobnoj temperaturi

### 6.5.2 Korelacijska i regresijska analiza rezultata za kompozit umreživan u termostatu

U slučaju kod kompozita umreživanog u termostatu uzete su vrijednosti za epruvete bez zareza iz tablica 8, 14 i 16. Zavisna varijabla je udarna žilavost, a nezavisne varijable su tvrdoća i udio šupljina.

Matrica koeficijenata korelacije između nezavisnih varijabli međusobno, te nezavisnih varijabli i zavisne varijable, dana je u tablici 23.

**Tablica 23.** Matrica koeficijenata korelacije za kompozit umreživan u termostatu

Koeficijent korelacije, <i>r</i>	Udarna žilavost	Tvrdoća	Udio šupljina
Udarna žilavost	1,000000	-0,716115	-0,426057
Tvrdoća	-0,716115	1,000000	0,409374
Udio šupljina	-0,426057	0,409374	1,000000

Testiranjem značajnosti koeficijenta korelacije između nezavisnih varijabli, te nezavisnih varijabli i zavisne varijable, Studentovim t-testom utvrđeno je da između nezavisnih varijabli ne postoji korelacija. Također, korelacija ne postoji ni između nezavisnih varijabli i zavisne varijable.

**Tablica 24:** Rezultati regresijske analize za kompozit umreživan u termostatu

Nezavisna varijabla	Koeficijent	Standardna greška	Nivo signifikantnosti	t-vrijednost
Konstanta	655,3836	436,6631	0,272190	1,50089
Tvrdoća	-6,1488	4,9988	0,343726	-1,23007
Udio šupljina	-2,1844	7,2383	0,791309	-0,30178

koeficijent višestruke korelacije:  $r=0,73077$

koeficijent determinacije:  $r^2=0,0680$

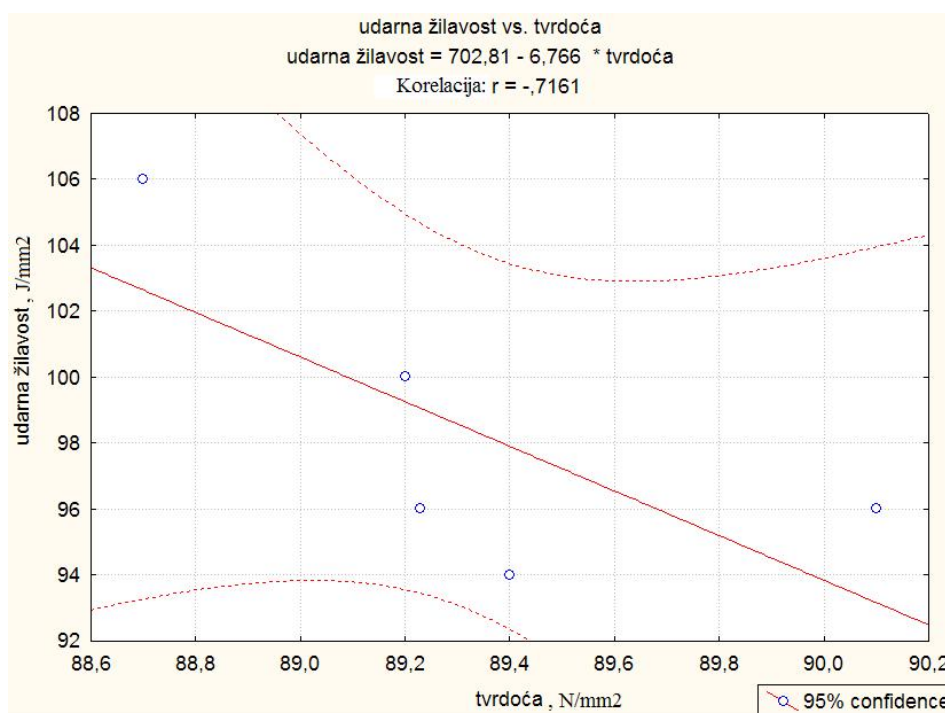
standardna greška procjene:  $s_e=4,6095$

**Tablica 25:** Analiza varijance za regresiju (kompozit umreživan u termostatu)

Izvor varijance	Suma kvadrata odstupanja	Stupnjevi slobode	Srednja vrijednost kvadrata odstupanja	F-vrijednost
Regresija	48,70432	2	24,35216	1,146100
Greška	42,49568	2	21,24784	

Koeficijent determinacije,  $r^2=0,0680$ , znači da je 6% zbroja kvadrata odstupanja obuhvaćeno modelom.

Vrijednosti tvrdoće kretale su se u granicama od 88,7 do 90,1. Koeficijent nagiba regresijskog pravca iznosi;  $b_s=-6,1488 \text{ Jmm}^{-2}/\%$ , što ukazuje na negativno djelovanje. Odnosno, tvrdoća doprinosi smanjenju udarne žilavosti, slika 38.

**Slika 38.** Djelovanje tvrdoće na udarnu žilavost kompozita umreživanog u termostatu

Kod procjenjivanja međuslojne čvrstoće u zavisnosti od tvrdoće i udjela šupljina zavisna varijabla je međuslojna čvrstoća, a tvrdoća i udio šupljina su nezavisne varijable.

Matrica koeficijenata korelacije između nezavisnih varijabli međusobno, te nezavisnih varijabli i zavisne varijable, dana je u tablici 26.

**Tablica 26:** Matrica koeficijenata korelacije za kompozit umreživan u termostatu. Međuslojna čvrstoća u zavisnosti od tvrdoće i udjela šupljina

Koeficijent korelacije, <i>r</i>	Međuslojna čvrstoća	Tvrdoća	Udio šupljina
Međuslojna čvrstoća	1,000000	-0,344527	-0,988638
Tvrdoća	-0,344527	1,000000	0,057244
Udio šupljina	-0,988638	0,057244	1,000000

Testiranjem značajnosti koeficijenta korelacije između nezavisnih varijabli, te nezavisnih varijabli i zavisne varijable, Studentovim t-testom utvrđeno je da između nezavisnih varijabli ne postoji korelacija. Međutim, korelacija postoji između nezavisne varijable i zavisne varijable. Odnosno, između udjela šupljina i međuslojne čvrstoće.

**Tablica 27:** Rezultati regresijske analize za kompozit umreživan u termostatu. Međuslojna čvrstoća u zavisnosti od tvrdoće i udjela šupljina

Nezavisna varijabla	Koeficijent	Standardna greška	Nivo signifikantnosti	t-vrijednost
Konstanta	13,1716	73,94365	0,875030	0,17813
Tvrdoća	0,5848	0,84648	0,561079	0,69083
Udio šupljina	-11,9230	1,22571	0,010404	-9,72740

koeficijent višestruke korelacije:  $r=0,99083$

koeficijent determinacije:  $r^2=0,96351$

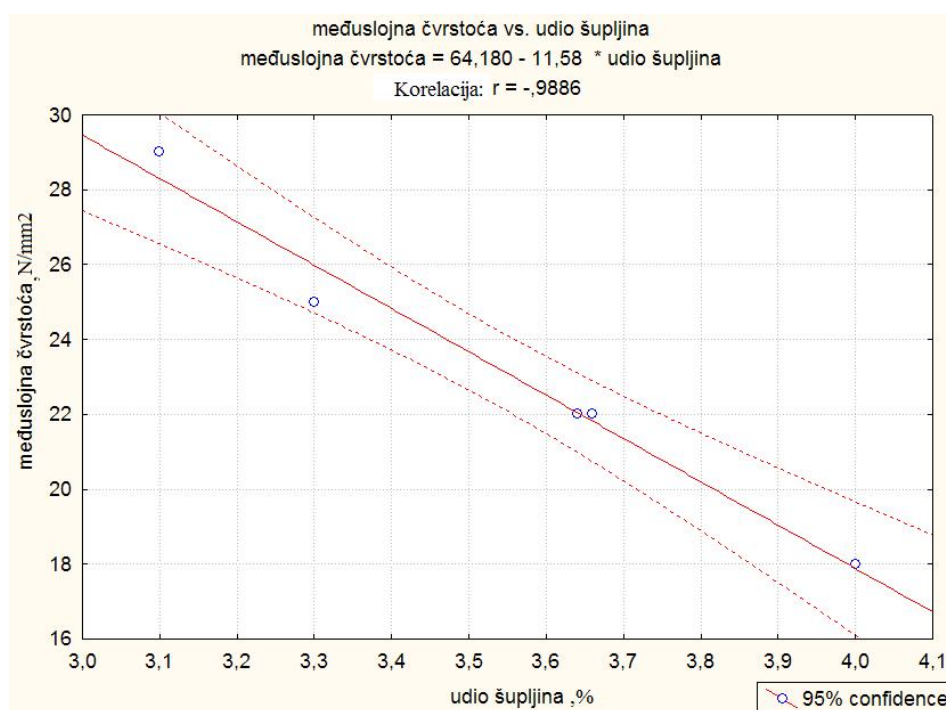
standardna greška procjene:  $s_e=0,78057$

**Tablica 28:** Analiza varijance za regresiju (kompozit umreživan u termostatu). Međuslojna čvrstoća u zavisnosti od tvrdoće i udjela šupljina

Izvor varijance	Suma kvadrata odstupanja	Stupnjevi slobode	Srednja vrijednost kvadrata odstupanja	F-vrijednost
Regresija	65,58142	2	32,79071	53,81796
Greška	1,21858	2	0,60929	

Koeficijent determinacije,  $r^2=0,96351$ , znači da je 96% zbroja kvadrata odstupanja obuhvaćeno modelom.

Vrijednosti udjela šupljina kretale su se u granicama od 3,1 do 4. Koeficijent nagiba regresijskog pravca iznosi;  $b_s=-11,9230 \text{ Jmm}^{-2}/\%$ , što ukazuje na negativno djelovanje. Odnosno, što je manji udio šupljina vrijednosti međuslojne čvrstoće su veće, slika 39.



Slika 39. Djelovanje udjela šupljina na međuslojnu čvrstoću kompozita umreživanog u termostatu

## 7. ZAKLJUČAK

Usporedbom kompozita jednakog sastava ali različitih uvjeta umreživanja ustanovljeno je sljedeće:

1. Ispitivanje udarne žilavosti pokazalo je da kompozit umreživan u termostatu ima bolju žilavost. To se odnosi na ispitivanja nezarezanih kao i na epruvete sa zarezom. Međutim, usporedbom rezultata dobivenih ispitivanjem nakon godinu dana vidljivo je da je kod epruveta bez zareza tijekom vremena povećana udarna žilavost, dok je kod zarezanih epruveta udarna žilavost smanjena. Kako je s vremenom napredovao proces umreživanja, koji zbog velike viskoznosti polimernih smola se pri završetku reakcije odvija vrlo sporo i može trajati tjednima, pa i dulje, i kod epruveta umreživanih pri sobnoj temperaturi došlo je do povećanja žilavosti, ali je zarezivanjem narušena struktura, pa je to dovelo do pada žilavosti.

2. Objašnjenje bolje žilavosti kompozita umreživanog u termostatu vidljivo je iz rezultata određivanja prividne međuslojne čvrstoće: veća međuslojna čvrstoća od onih umreživanih pri sobnoj temperaturi ukazuje na bolju povezanost smole i ojačala.

3. Određivanje tvrdoće ispitivanih kompozita metodom utiskivanja kuglice ukazuju na bolju tvrdoću kompozita umreživanog pri sobnoj temperaturi. Koeficijent nagiba regresijskog pravca ukazuje na izuzetno negativno djelovanje tvrdoće na udarnu žilavost kompozita, pa se time može objasniti značajno manja udarna žilavost kompozita umreživnog pri sobnoj temperaturi.

4. Udio šupljina u kompozitu umreživanom u termostatu puno je manji, gotovo za 10% (sadržaj šupljina 3,66 %) od onog umreživanog pri sobnoj temperaturi (13,25%). Regresijskom analizom pokazano je da udio šupljina znatno utječe na smanjenje međuslojne čvrstoće.

5. Korelacijska i regresijska analiza pokazala je povezanost između udjela šupljina, međuslojne čvrstoće i udarne žilavosti kod oba kompozita. Odnosno, povećanje udjela šupljina dovodi do sniženja međuslojne čvrstoće koja uzrokuje slabu udarnu žilavost.

Analiza utjecaja tvrdoće na udarnu žilavost pokazala je da tvrdoća značajno utječe na rezultate udarne žilavosti kod kompozita umreživanog pri sobnoj temperaturi dok kod kompozita umreživanog u termostatu tvrdoća utječe na pad udarne žilavosti ali ona nije značajna. Mogući razlog zbog kojeg tvrdoća ne utječe značajno na udarnu žilavost je greška u mjerenju. Također, kod oba kompozita ne postoji veza između udjela šupljina i tvrdoće.

Kako su oba kompozita pripravljeni ručno uz približno iste uvjete osim umreživanja, po kojima se jedino razlikuju, očito je da je upravo temperatura umreživanja uvjetovala nastajanje razlika u svojstvima ispitivanih kompozita.



## 8. LITERATURA

- [1] Filetin T., Kovačiček F., Indof J., Svojstva i primjena materijala, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2002.
- [2] Miracle D.B., Donaldson S.L., ASM Handbook Volume 21: Composites, ASM International, Ohio, 2001
- [3] Filetin T., Izbor materijala pri razvoju proizvoda, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2006.
- [4] [www.acp-composites.com](http://www.acp-composites.com)
- [5] [www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org)
- [6] Španiček Đ., Smolčić Žerdik Z., Povezanost strukture polimernih kompozita i djelovanja medija, DPG, Zagreb, 2001
- [7] [www.metallographic.com](http://www.metallographic.com)
- [8] [www.fsb.hr](http://www.fsb.hr)